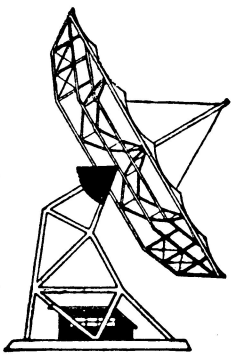
# de synthese radiotelescoop te westerbork

# de Synthese Radiotelescoop te Westerbork



**Uitgave van de**
**Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg**
(Artikelen verschenen in
Natuur en Techniek, juni 1970)

# de Synthese Radiotelescoop aan het werk

## enkele resultaten in het eerste jaar

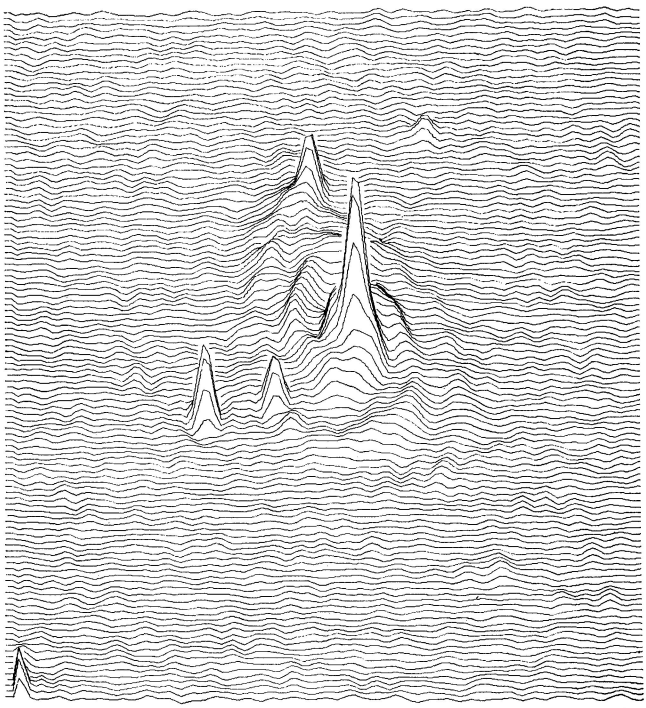
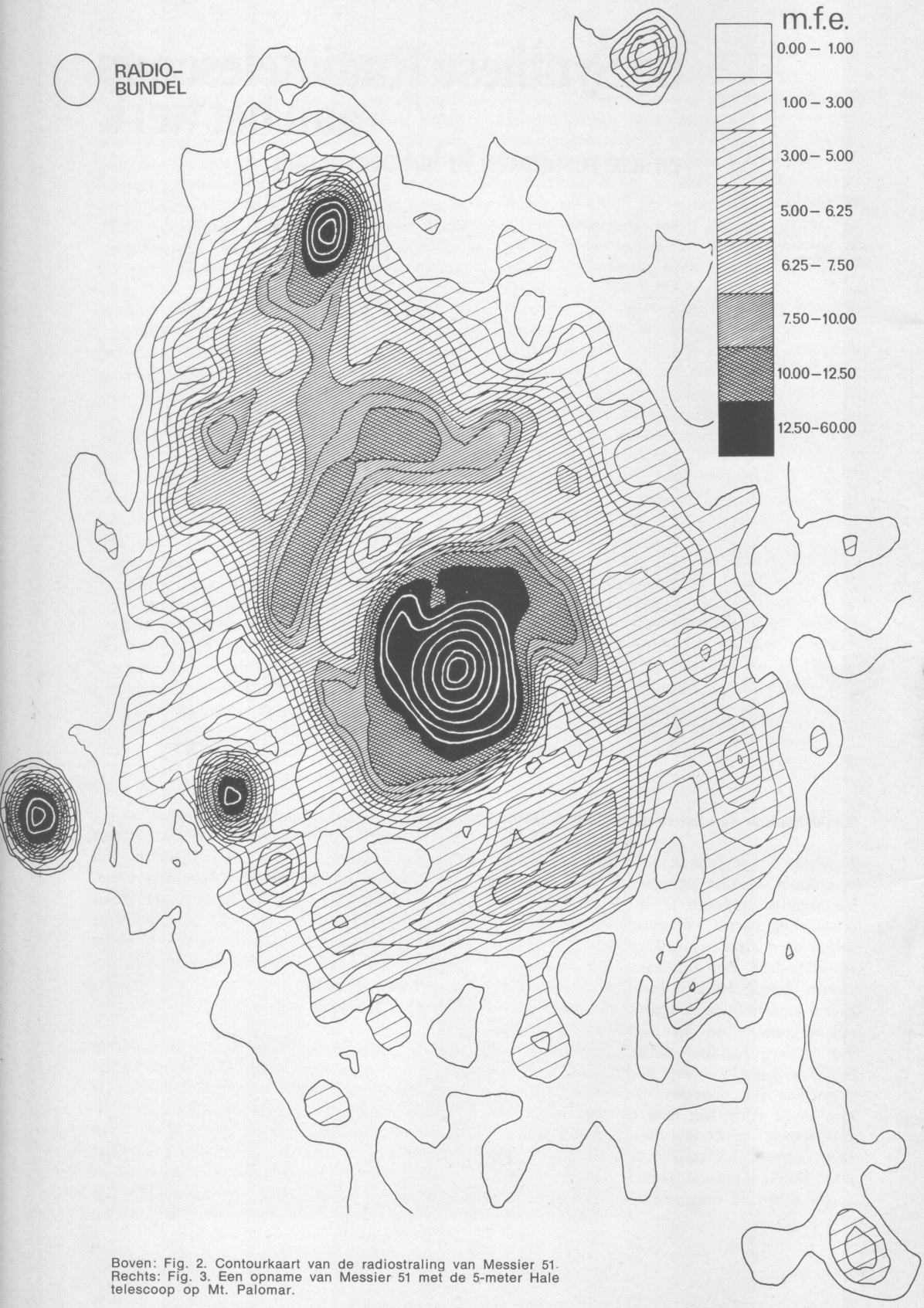


Fig. 1. Radiokaart van het spiraalstelsel Messier 51.

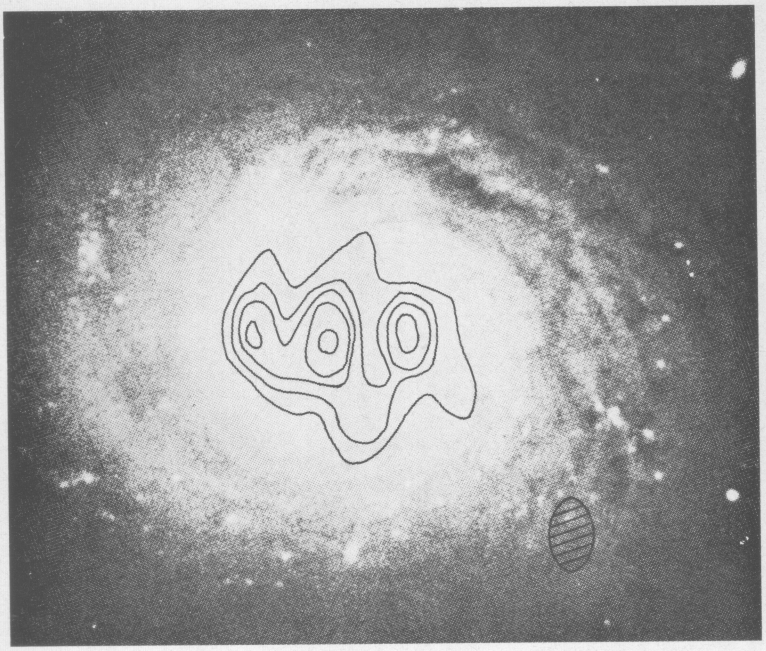
**Radiostructuur van het sterrenstelsel Messier 51**

Nummer 51 van de in 1771 door de Franse astronoom Messier verzamelde catalogus van nevelachtige objecten is in werkelijkheid een reusachtige zwerm van sterren en gas, van dezelfde aard als het „melkwegstelsel" waar onze zon deel van uitmaakt. De Messier-51-zwerm, die afgebeeld is in figuur 3, ligt op ongeveer tien miljoen lichtjaren afstand, ver buiten de grenzen van ons „eigen" stelsel. Hij bevat ruwweg honderd miljard zonsmassa's en heeft de vorm van een platte schijf met een doorsnede van ongeveer dertigduizend lichtjaren. In de schijf ziet men een opvallende spiraalvormige structuur, die in hoofdzaak uit twee „armen" bestaat die in diametraal tegenover elkaar liggende punten uit het kerngedeelte lijken te ontspringen. Zulke structuren worden in vele sterrenstelsels aangetroffen. De spiraalstructuur lijkt samen te hangen met een golfbeweging die om het middelpunt van het stelsel rondloopt. Het is echter nog onbekend waardoor deze golf ontstaan is. Misschien wordt hij in gang gezet door de merkwaardige uitstoting van gas uit de centrale gebieden, die men bij een aantal melkwegstelsels waargenomen heeft; misschien ook wordt hij aangedreven door krachten van buiten het stelsel.

Om te proberen wat verder in dit probleem door te dringen werd een van de eerste onderzoekingen met de synthese radiotelescoop te Westerbork gericht op Messier 51, om de verdeling van de door dit stelsel uitgezonden radiostraling te bepalen. Het merendeel van deze straling komt van elektronen die met bijna de lichtsnelheid rondbewegen in de zwakke mag-




Boven: Fig. 2. Contourkaart van de radiostraling van Messier 51.
Rechts: Fig. 3. Een opname van Messier 51 met de 5-meter Hale telescoop op Mt. Palomar.



neetvelden die overal in sterrenstelsels blijken voor te komen. De straling is sterker naarmate het magneetveld sterker is. Op de plaatsen waar dit door de golfbeweging wordt samengedrukt en versterkt, zal de sterkste straling optreden. Metingen van de intensiteit van de radiostraling maken het daarom mogelijk de samendrukking te meten en daardoor waardevolle gegevens te krijgen over de aan de spiraalstructuur ten grondslag liggende golfbeweging.

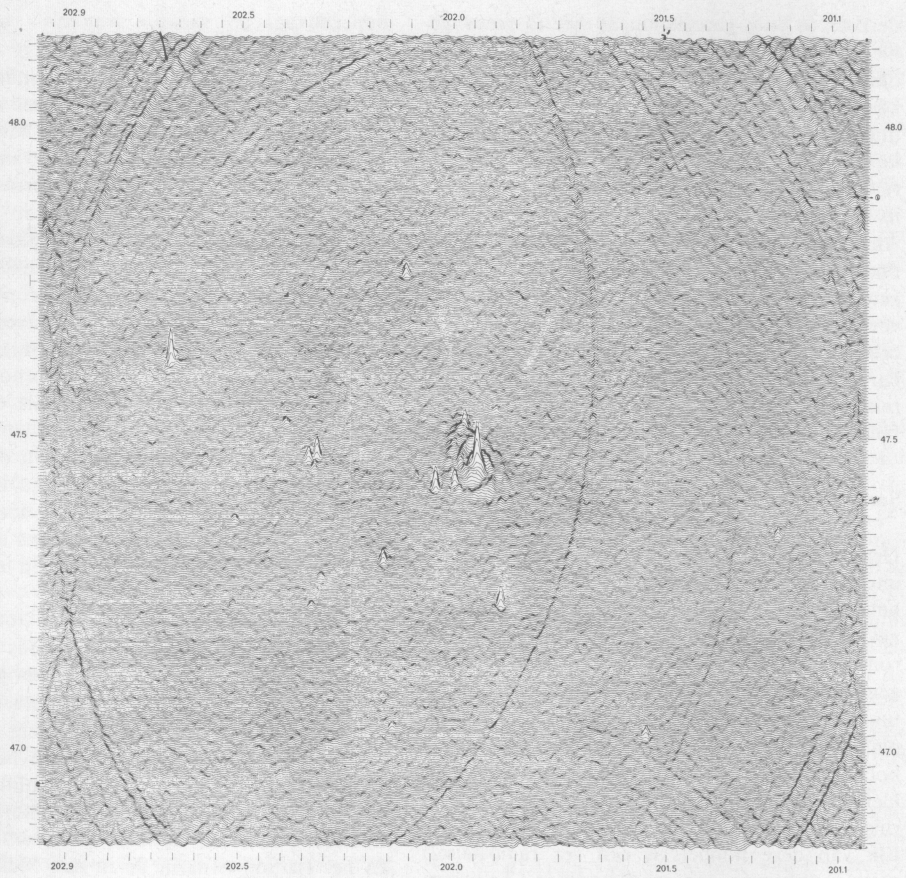
Fig. 1 vertoont het resultaat van vier maal twaalf uur waarnemen van Messier 51 met de synthesetelescoop. De computer te Leiden heeft het verloop van de radiohelderheid in dicht bij elkaar liggende horizontale stroken getekend. Ligt ergens in zo'n strook een gebiedje dat meetbare straling uitzendt, dan vertoont de overigens vrijwel horizontale lijn een piek waarvan de hoogte evenredig is met de sterkte van de straling.

Zo ontstaat een soort drie-dimensionaal beeld. Vergelijking van deze plaat en van de daaruit afgeleide contourkaart in fig. 2 met de optische afbeelding op dezelfde schaal in fig. 3 laat zien dat de spiraalarmen duidelijk waarneembare radiostraling uitzenden. Slechts in het binnenste deel is de scherpte van het radiobeeld (vergelijk de in de linker figuur aangegeven „vervagingsbundel") niet voldoende om de afzonderlijke armen te ontwarren.

Boven: Fig. 4. Het spiraalstelsel NGC 4736, met radiocontouren. De kern van dit stelsel emitteert sterke radiostraling. Aan weerszijden, op 40 boogsecunden of ongeveer 2500 lichtjaren afstand liggen twee andere bronnen, die vermoedelijk door de kern uitgestoten zijn. De gearceerde ellips rechtsonder toont de bundelgrootte van de radiotelescoop. (Onderzoek van P. C. van der Kruit).

Rechts: Fig. 5. Volledige synthese van een gebied van 1°.3 x 1°.3 rondom de spiraalnevel Messier 51. De grote krommen die door de figuur lopen zijn delen van de elliptische „diffractieringen" die rondom alle radiobronnen liggen, en het gevolg zijn van de rangschikking van de reflectoren van de synthese telescoop (zie ook de tekst). Bij het hier afgebeelde resultaat van een volledige synthese van vier maal twaalf uur waarnemen met vier verschillende standen van ieder van de twee verrijdbare reflectoren heeft de binnenste diffractiering een halve kleine as in de rechte klimming (de horizontale richting) van 0°.7, in de verticale coördinaat (de declinatie-richting) is deze een factor cosecans van de declinatie groter; in dit geval is de factor 1.36. De opvallende van onder tot boven door het veld lopende ellipskromme, een beetje rechts van Messier 51, is afkomstig van de heldere bron die aan de linkerkant van de figuur, op ongeveer 3/5 van de hoogte te zien is. De getallen langs de zijkanten geven de declinatie in graden, die langs de onder- en bovenzijde de rechte klimming, eveneens in graden.

Voor het eerst is hiermee een duidelijk radiobeeld van een spiraalstructuur verkregen. Dit is van aanzienlijk belang, zowel voor de theorie van de spiraalstructuren als voor ons inzicht in het proces van de vorming van sterren. Uit de waarneming dat tussen 2′ en 4′ van het centrum de radio-armen ruwweg 25° in positiehoek gedraaid liggen ten opzichte van de optische armen, kan men bijvoorbeeld de




interessante gevolgtrekking maken dat ongeveer vijf miljoen jaar nodig geweest zijn om sterren te vormen nadat het interstellaire gas samengedrukt was door de compressiegolf van de spiraalstructuur. Interessant is ook de sterke toename van de radio-intensiteit naar het centrum van Messier 51 en de grotere sterkte van deze straling in het gebied tussen Messier 51 zelf en de aan de bovenkant van de plaat liggende tweede componente van het dubbele sterrenstelsel vergeleken met de intensiteit in het daar tegenover liggende kwadrant. Deze tweede componente was tot dusver nog niet bij radiogolflengten gedetecteerd.
Van de twee sterke concentraties, die in fig. 2 links onder de grote centrale bron te zien zijn, is die welke het dichtst bij de kern ligt waarschijnlijk het overblijfsel van een supernovaexplosie die enkele eeuwen geleden in een buitenarm van Messier 51 moet hebben plaatsgevonden. Of de verste concentratie bij het spiraalstelsel hoort is onbekend. Hij kan ook een veel verder weg liggend onafhankelijk radiostelsel zijn. Het onderzoek van Messier 51 werd gedaan door D. S. Mathewson en P. C. van der Kruit.

**Activiteit in kernen van sterrenstelsels**

Op pp. 13 en 57 wordt melding gemaakt van de merkwaardige dingen die in de kernen van melkwegstelsels lijken te geschieden, dingen die soms leiden tot uitstoting van enorme gasmassa's en die misschien ook invloed uitoefenen op de gehele structuur van deze stelsels. Een diepgaand onderzoek van de activiteit van deze kernen is daarom van groot belang.
Deze activiteit nu uit zich vaak op opvallende wijze in de radiostraling. Hierom is aan de bestudering van spiraalnevelkernen en de samenhang tussen kernactiviteit en spiraalstructuur een belangrijke plaats gegeven. Het on-

derzoek is nog gaande, maar het is reeds gebleken dat in alle spiraalstelsels waarin langs optische weg heftige bewegingen van gaswolken in de kerngebieden aangetoond zijn, óók intense radiostraling uit deze centrale delen komt. De radiobronnen in de kernen van spiraalstelsels zijn soms meervoudig, zoals in het in fig. 4 geïllustreerde geval.
Anderzijds heeft een uitgebreid Westerbork-onderzoek van zg. quasistellaire objecten aangetoond dat bij dit soort objecten enorme hoeveelheden *optische* synchrotronstraling geproduceerd kunnen worden, zonder dat er vergelijkbare hoeveelheden radiostraling uitkomen. De relatieve intensiteit der *radio*-straling blijkt over factoren van 1 op 10 000, of meer, te variëren.

**Survey van zeer zwakke radiobronnen**

Deze survey is onderdeel van een uitgebreid onderzoek naar de structuur en evolutie van het heelal. Fig. 5 illustreert hoe dit wordt uitgevoerd. Deze toont een veld van 1°.3 x 1°.3 rondom Messier 51, dat 48 uur lang is waargenomen. Behalve de meer ingewikkelde structuur van Messier 51 in het midden van de plaat, ziet men over het hele veld een aantal hobbeltjes die duidelijk uitsteken boven de kleine algemene golvingen veroorzaakt door de ruis van de ontvanger.
Elk van deze hobbels is een ver radiostelsel; geen van hen is ooit waargenomen. Tellingen van deze bronnen van verschillende helderheid, en bepaling van hun radiospectrum, hun structuur en polarisatie-eigenschappen worden gebruikt bij het onderzoek van het heelal. De gemiddelde afstand van de zwakkere bronnen is ongeveer tien miljard lichtjaren; zij bestonden toen het heelal ongeveer drie tot zes maal jonger was dan thans. Wellicht blikken we hier terug tot in het tijdperk toen de eerste sterrenstelsels in het heelal ontstonden.
Opvallende verschijnselen in Fig. 5 zijn de ellipsvormige krommen die op allerlei plaatsen door de figuur lopen. Deze zijn te wijten aan de diffractie van de straling van de sterkere bronnen, veroorzaakt door het feit dat we geen volledige telescoop hebben maar afzonderlijke spiegels die op bepaalde afstanden van elkaar staan. Van de „diffractieringen" van Messier 51 ziet men een deel aan de linkerrand van de plaat en verder heel duidelijk in alle vier de hoeken. Een deel van de ellipsen zijn veroorzaakt door bronnen die buiten het afgebeelde veld staan.

**Supernovae**

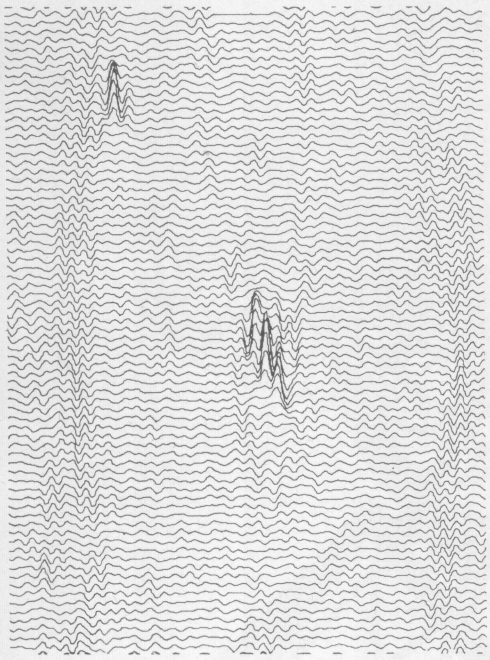
Fig. 1 en 2 vertonen twee opvallende „radiobronnen" links van het centrale deel van Messier 51. Degeen die het dichtst bij het centrum ligt is hoogstwaarschijnlijk de rest van een één of twee eeuwen geleden geëxplodeerde ster van dit sterrenstelsel.
Het bij zo'n zg. „supernova"-explosie uitgeworpen gas kan nog honderdduizenden jaren zichtbaar blijven, en zendt al die tijd sterke straling bij radiogolflengten uit. In ons Melkwegstelsel en zijn satellieten, de Maghellaense Wolken, zijn vele van deze supernova-resten gevonden; in enkele gevallen, zoals de Krabnevel (fig. 1 en 2 op pp. 10 en 11), vond de uitbarsting in historische tijd plaats, in de meeste gevallen lagen zij echter heel ver in het verleden, tot honderdduizenden jaren toe. De in Messier 51 gevonden supernova-rest is de eerste die buiten het Melkwegstelsel en zijn satellieten gevonden is.
Supernova-explosies kunnen leiden tot de vorming van zg. pulsars, die hunnerzijds van fundamenteel belang zijn voor het begrip van allerlei tot nu toe raadselachtige verschijnselen. We weten echter betrekkelijk weinig over het mechanisme van de supernovae. In het bijzonder is weinig bekend over hun evolutie tussen het meestal slechts enkele maanden durende stadium waarin zij optisch waarneembaar zijn en het stadium waarin de in ons Melkwegstelsel gevonden supernova-resten zich bevinden. Zelfs voor de jongste onder hen ligt dit verscheidene eeuwen later.
Inlichtingen over de tussenliggende stadia kunnen slechts verkregen worden door supernovae in *andere* sterrenstelsels waar te nemen. Supernovae zijn nl. zo zeldzaam dat er zelfs in een groot sterrenstelsel als het Melkwegstelsel niet veel meer dan eens per eeuw een opvlamt. Een van de programma's in Westerbork beoogt inlichtingen te krijgen over de tussenliggende supernova-stadia door de radiostraling te meten van supernovae die gedurende de laatste halve eeuw in andere sterrenstelsels opgevlamd zijn.
Het programma is pas begonnen. Tot nu toe zijn nog geen gevallen ontdekt waar een duidelijke radiostraling is te zien.

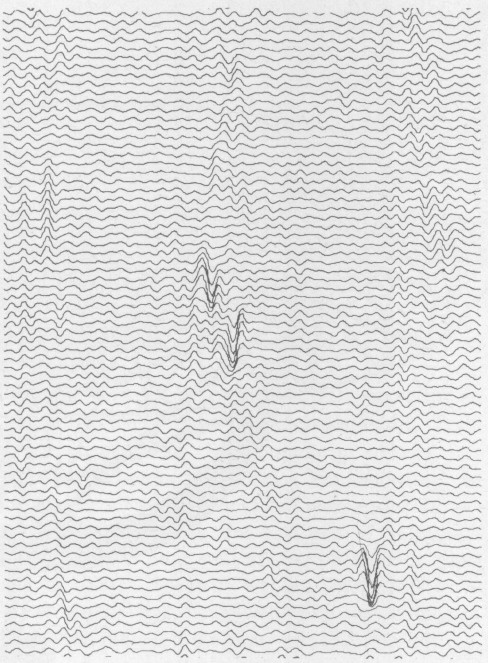
**Röntgenbronnen**

Supernova-resten zijn niet alleen bronnen van intense *radio*straling maar óók van straling in

het *Röntgen*gebied, bij golflengten die zo'n tien miljard maal korter zijn. De Krabnevel is bijvoorbeeld een sterke Röntgenbron. Of *alle* Röntgenbronnen met supernovae samenhangen is nog onzeker. Bij de helderste Röntgenbron, Scorpius X-1, is nog geen enkele directe aanwijzing van zo'n samenhang gevonden. Wél emitteert deze óók radiostraling, en wel met een merkwaardige structuur, zoals in fig. 6 te

Fig. 6 en 7. Scorpius X-1, een ster op ongeveer 1000 lichtjaren afstand, die sterke straling in het gebied van de Röntgengolflengten uitzendt. Bij radiogolflengten vertoont de Röntgenbron drie componenten: de drie dicht bij elkaar liggende toppen in het midden van fig. 6 (29/30 maart 1971). De centrale componente is sterk en snel variabel, zoals te zien is in fig. 7, die een radio„opname" geeft die één etmaal vóór die van fig. 6 opgenomen is. Hier is de centrale componente geheel onzichtbaar (gegevens ontleend aan een onderzoek van L. L. E. Braes en G. K. Miley).

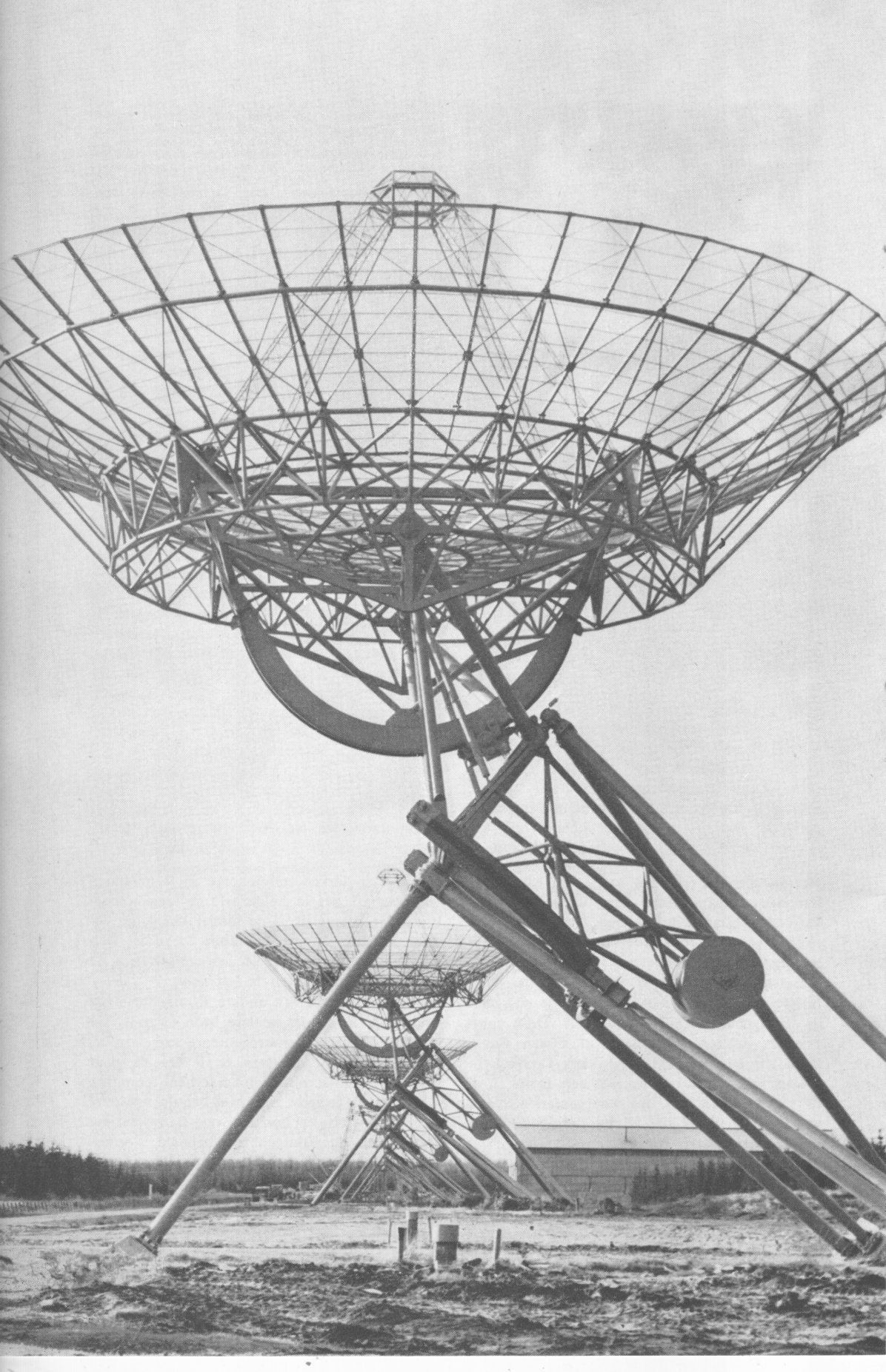




zien is, die het resultaat toont van een zeven uur lange integratie met de synthese telescoop. De bron bestaat uit drie ongeveer op één lijn liggende componenten. De buitenste componenten liggen op respectievelijk 1.3 en 2.0 boogminuten afstand van de centrale bron. Deze laatste valt samen met het sterretje dat met de Röntgenbron geïdentificeerd is. Deze componente is, zoals het eerst in Green Bank, West Virginia, ontdekt werd, sterk variabel. In Westerbork zijn variaties met een factor 2 in de tijd van een half uur waargenomen. Vaak wordt zij zo zwak dat zij bij radiogolflengten onwaarneembaar is (zie fig. 7).

Bij de beide andere componenten was tot voor kort geen variatie gevonden. Recente waarnemingen in Westerbork lijken echter aan te duiden dat de linker componente in 9 maanden ongeveer 25 pct in helderheid is toegenomen. Bijzonder belangrijk is de mogelijkheid die deze waarnemingen in een nabije toekomst wellicht bieden zullen om de *bewegingen* van de buitenste componenten te bepalen.

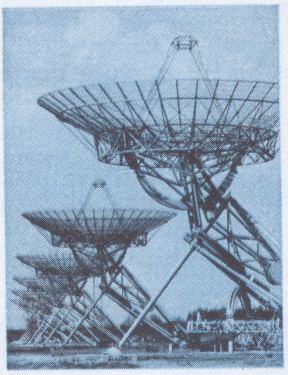
Bij het onderzoek van andere Röntgenbronnen werd ontdekt dat de heldere bron Cygnus X-1 in april 1971 goed waarneembare radiostraling uitzond. In februari was er tevergeefs naar gezocht, en moet zijn radiohelderheid tenminste 4 x zwakker geweest zijn. Met behulp van deze radiowaarnemingen kon een veel nauwkeuriger positie van de Röntgenbron bepaald worden. Deze leidde tot een onverwachte identificatie van deze bron met een heldere ster van hoge temperatuur.



# de betekenis

**J. H. Oort,**
Sterrewacht te Leiden

## van de Synthese Radiotelescoop te Westerbork



De nieuwe synthese radiotelescoop te Westerbork is in zijn soort het grootste en gevoeligste instrumentarium dat de wereld op het ogenblik heeft.
Behalve antwoorden op enkele nu al bestaande vragen over verschijnselen die lang geleden in het heelal zijn opgetreden, zal dit gigantische instrumentarium hoogstwaarschijnlijk nu nog onvermoede gebieden open leggen.

Drie duizend jaar lang is informatie over de wereld buiten de aarde alleen door *licht* tot ons gekomen, dus door trillingen die onze *ogen* konden waarnemen. Een kwart eeuw geleden vond echter een enorme doorbraak plaats, en wel door de *beide* dijken die het optische gebied begrensden. De eerste doorbraak kwam aan de kant van de *lange* golven en overspoelde het hele radiogebied, dat tot dusver slechts gebruikt was voor communicatie op de aarde. Het strekte zich uit tot golflengtes die een miljoen maal langer waren dan die van het licht. De in de oorlog ontwikkelde radartechniek heeft niet onbelangrijk bijgedragen om de doorbraak te versnellen.
Al vrij spoedig werden de methoden van radio-ontvangst zo sterk verbeterd dat de zwakke hemelse straling gemeten kon worden over een golflengtegebied dat zich uitstrekte van millimeters tot kilometers. In muziektermen komt dat overeen met twintig octaven, en dat overtreft dus wel heel ver het ene octaaf waarin alle lichtgolven liggen. In de laatste vijf jaar zijn er nog de belangrijke zeven octaven van de infrarode straling bijgekomen; en in diezelfde periode begon, met behulp van raketten en satellieten, ook de doorbraak aan de andere kant, naar het verre ultraviolet en de Röntgenstraling, met golflengtes die duizenden malen *korter* zijn dan die van het licht (zie ook de bijdrage van Van der Laan en Van Woerden in deze uitgave).

Het is niet te verwonderen dat deze fantastische uitbreiding van het observatievermogen een enorme verdieping heeft gebracht van ons inzicht in de wereld om ons heen. De nieuwe waarneemmogelijkheden stelden ons in staat om, als van een grotere hoogte, *verder* uit te zien over de wereld die we al gedeeltelijk kenden.
Zo konden bijvoorbeeld waarnemingen van een door Van de Hulst voorspelde straling van het waterstofatoom bij 21 cm golflengte de merkwaardige spiraalvormige structuur van het gas in het Melkwegstelsel aan het licht brengen, en konden er vele eigenschappen van worden bestudeerd, die tot dusver onbekend waren. Bovendien opende de ontdekking van zeer ver verwijderde zg. radiobronnen (dat zijn sterrenstelsels die uitzonderlijk intense straling bij radiogolflengtes uitzenden) een weg waarlangs

veel verder in het heelal kon worden doorgedrongen dan tot dusver mogelijk was.
Op het eerste gezicht mag dit niet zo interessant lijken: de astronomen waren tóch al tot zo onvoorstelbare afstanden gekomen dat nog een stap verder niet zo boeiend lijkt te zijn. Toch is het dat, en wel op heel bijzondere wijze. Deze stap brengt ons nl. juist zo ver dat we voor het eerst — zij het dan nog vaag — aan de verste einder iets van de grenzen van het heelal kunnen ontwaren. Zoals in een volgend artikel toegelicht wordt, zijn sommige radiobronnen intrinsiek zó helder dat ze met een radiotelescoop als die in Westerbork nog zichtbaar moeten zijn op afstanden die — om in een aardse analogie te spreken — achter de horizon liggen.

Ook op aarde kan men wel objecten achter de horizon zien. Aan de kust staande kan men bij helder weer soms de toppen van de masten zien van schepen die zelf voorbij de horizon liggen. Als men weet hoe ver de twee masten uit elkaar staan en hoe hoog zij zijn, kan men uit de waarneming van de afstand tussen de masten en hun hoogte boven de horizon (beide in hoekmaat gemeten) zowel de afstand van het schip als de straal van de aarde berekenen. Ons ideaal is om ééns op een dergelijke manier de kromtestraal van het heelal te kunnen meten. Men moet nl. aannemen dat op heel grote schaal beschouwd de *drie*-dimensionale *ruimte* waarin alle sterrenstelsels zich bevinden een kromming heeft, die analoog is aan de kromming die *twee*-dimensionale *oppervlakken* kunnen hebben, zoals bijvoorbeeld het aardoppervlak. Evenals het oppervlak van de aarde in zichzelf gesloten en dus eindig is, zo zou dan ook de gehele ruimte — dus het heelal — in zichzelf gesloten en eindig van inhoud zijn.
Een oppervlak kan echter ook op een andere manier gekromd zijn, zoals bijvoorbeeld een hyperboloïde; deze is *open* en heeft een oneindig groot oppervlak (zie bijv. Natuur en

Fig. 1. De Krabnevel gefotografeerd in gewoon licht. Deze foto toont de door de supernova in het jaar 1054 uitgestoten gasslierten, die nog steeds met grote snelheid expanderen. (Deze en de foto rechts zijn opgenomen met de 5-meter Hale telescoop op Mount Palomar).

Techniek *35*, p. 217). Evenzo zou ook het heelal oneindig kunnen zijn en een oneindig grote massa hebben. De vraag of het heelal eindig dan wel oneindig is, zou beantwoord kunnen worden indien het zou gelukken zijn kromtestraal te meten.

Zoals in een volgend artikel uiteengezet is, bestaan de radiobronnen bijna altijd uit *twee* componenten, die gemiddeld ongeveer 300.000 lichtjaren uiteen liggen. Zij zijn de twee-masters waarmee we hierboven de kromtestraal van de aarde maten. In het *heelal* moet de wijze waarterbork-telescoop.
Meting van de hoek waaronder we een dubbele radiobron zien is echter niet voldoende. Men moet ook kunnen meten hoe ver de radiobron van ons verwijderd is. Het is geenszins zeker dat dit met radiomethoden zal gelukken. In ieder geval zullen er nog lange onderzoekingen voor nodig zijn. Onze hoop is dat de telescoop van Westerbork wezenlijk zal bijdragen tot het slagen van deze allerverste expeditie die ooit ondernomen is.
Dit was een voorbeeld — een gróót voorbeeld — van hoe de radio-astronomie ons uitzicht

Fig. 2. De Krabnevel gefotografeerd in synchrotronlicht. Deze foto geeft de verdeling van de met bijna lichtsnelheid in het ingewikkelde magnetische veld van de Krabnevel rondbewegende elektronen. Deze elektronen worden nog voortdurend geproduceerd.

op de hoekafstand tussen de componenten verandert, als we verder liggende en tenslotte achter de „horizon" verdwijnende radiobronnen bekijken, de bepaling van de kromtestraal van het heelal mogelijk maken. De hoekafstanden worden op deze afstanden echter zo klein dat ze zelfs met de grootste enkelvoudige radiotelescoop niet gemeten kunnen worden. Zij liggen echter wél binnen het bereik van de Westover de reeds bekende wereld kan verwijden. De nieuwe waarneemtechnieken hebben echter méér gebracht dan een vergroting van onze gezichtskring. Ze hebben ons, eigenlijk geheel onverwacht, de fundamentele betekenis doen beseffen van een nieuw aspect van de ons omringende wereld; iets wat je zou kunnen noemen het onstabiele, heftige, explosieve aspect. Deze eigenschap, die in de mensenwereld

slechts voorbijgaand, in oorlogen, een belangrijke rol gespeeld heeft, schijnt een essentieel deel van het heelal voortdurend te beheersen. Bij *optische* waarnemingen laat het heelal zich hoofdzakelijk van zijn rustige kant zien. Zowel onze eigen zon als de enkele honderden miljarden andere zonnen die het melkwegstelsel vormen, zenden een vrijwel constante straling uit. Enkele sterren vertonen wel eens een hevige uitbarsting van licht, als ze opvlammen als zg. nieuwe ster, of „nova", maar dit is een zeldzame, en in het leven van een ster kortstondige gebeurtenis. In nóg veel zeldzamer gevallen explodeert een gehele ster, als „supernova". Maar voor de wereld als geheel leken deze explosieve gebeurtenissen van slechts bijkomstig belang.
De intrede der radio-astronomie bracht in deze „rustige" opvatting van het heelal echter een revolutie teweeg.

Zoals in een volgend artikel beschreven wordt, ontstaat straling bij radiogolflengtes in de regel op een geheel andere manier dan de licht- en warmtestraling, waarmee we in ons dagelijks leven te maken hebben, nl. uit elektronen die bijna met lichtsnelheid bewegen in een magnetisch veld. Deze straling, die gewoonlijk synchrotronstraling genoemd wordt, kan alle mogelijke golflengtes hebben. Dat zij ook in de natuur voor kon komen, werd het eerst overtuigend aangetoond door metingen van de polarisatie van het licht van de Krabnevel (fig. 1 en 2). Uit ruwe metingen in Burakan (in Armenië) en later uit veel gedetailleerder metingen in Leiden werd gevonden dat de straling van verschillende delen van de Krabnevel een zo hoge polarisatiegraad had als slechts het synchrotronmechanisme kan opleveren. De Krabnevel zendt niet alleen synchrotronstraling in het optische gebied uit, maar eveneens bij radiogolflengtes. Zij is zelfs een der sterkste radiobronnen aan de hemel.
Ook de radiostraling die de veel verder weg gelegen radio*stelsels* uitzenden, is van deze zelfde aard. Het voorkomen van synchrotronstraling in de natuur was iets volkomen onverwachts. Het is lange tijd een groot raadsel gebleven, wat voor mechanisme in staat zou zijn op zo gigantische schaal deeltjes van de vereiste hoge energie te produceren.
Pas heel kort geleden is door de ontdekking van een zg. pulsar in het centrum van de Krabnevel iets

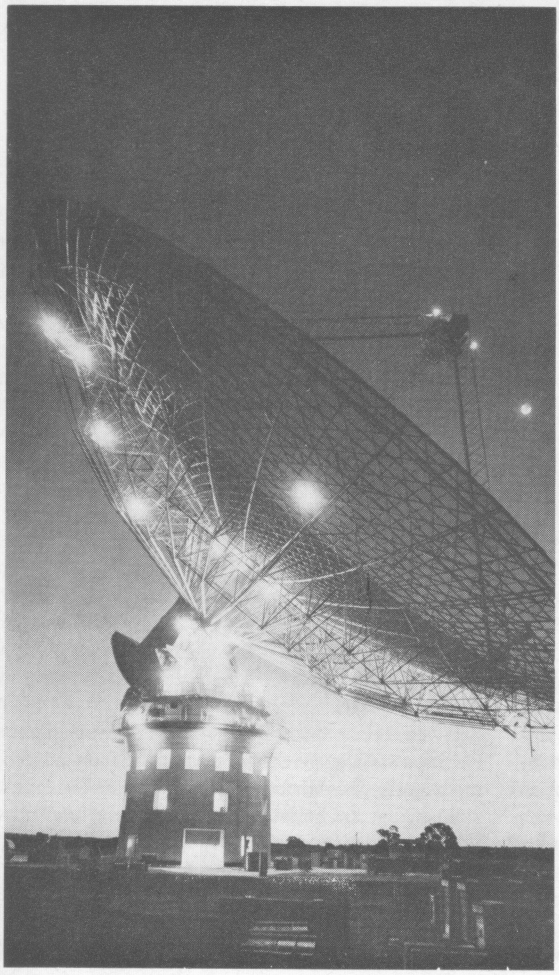


Fig. 3. De radiotelescoop van Parkes (Australië), die met een diameter van 210 voet een van de meest gevoelige instrumenten is, waarmee radiogolven uit delen van het heelal die tot miljarden lichtjaren van ons verwijderd liggen, kunnen worden opgevangen. (Foto: Austr. Inform. Service).

van de sluier van dit raadsel opgelicht. De Krabnevel en zijn pulsar zijn de resten van een in 1054 geëxplodeerde ster. In het heelal komen echter nog veel grotere explosies voor, waarmee vergeleken de uiteenspatting van één zon, hoe enorm deze op zichzelf ook is, slechts een minieme gebeurtenis is.

Een voorbeeld hiervan geeft het sterrenstelsel NGC 1275 in Perseus te zien (fig. 4 en 5). Deze enigszins onregelmatig gevormde sterrenzwerm bestaat uit ruwweg honderd miljard zonnen, met daartussen een aanzienlijke massa van nog niet in zonnen geconcentreerd gas. Met dat gas is iets heel merkwaardigs aan de hand. De helft ervan beweegt met dezelfde snelheid als het sterrenstelsel, maar de andere helft heeft een snelheid die 3000 km per seconde daarvan verschilt.
De enige aannemelijke verklaring is, dat dit gas door het sterrenstelsel uitgestoten is, en wel, zeer waarschijnlijk, uit een relatief heel klein kerngedeelte van het stelsel. Uit spectroscopische waarnemingen ziet men dat de „vulkaan" in deze kern ook thans nog in werking is, zij het ook niet met zó hoge eruptie-snelheden als in het verleden.
Dit stelsel is tegelijk een sterke radiobron; als zodanig draagt het de naam: Perseus A. Evenals bij de Krabnevel lijkt ook hier een samenhang te bestaan tussen gigantische eruptieve processen en de vorming van de deeltjes van heel hoge energie die verantwoordelijk zijn voor de radiostraling. Waarschijnlijk is dit in alle radiobronnen het geval en zijn de geboorteplaatsen van de met bijna lichtsnelheid bewegende deeltjes altijd tevens plaatsen van heftige gebeurtenissen.
Vele dingen duiden er op dat deze verschijnselen steeds hun uiteindelijke oorsprong hebben in de *kernen* van grote sterrenzwermen of melkwegstelsels. En het is óók meer en meer duidelijk geworden dat niet slechts de grote radiobronnen dergelijke eruptieve kernen bevatten, maar dat deze in een grote fractie van de „normale" sterrenstelsels, en ook in ons eigen Melkwegstelsel, voorkomen.

Wat zetelt er voor wonderlijks in deze kernen? Draait daar een reuze-synchrotron, of is er misschien in de kernen iets overgebleven van

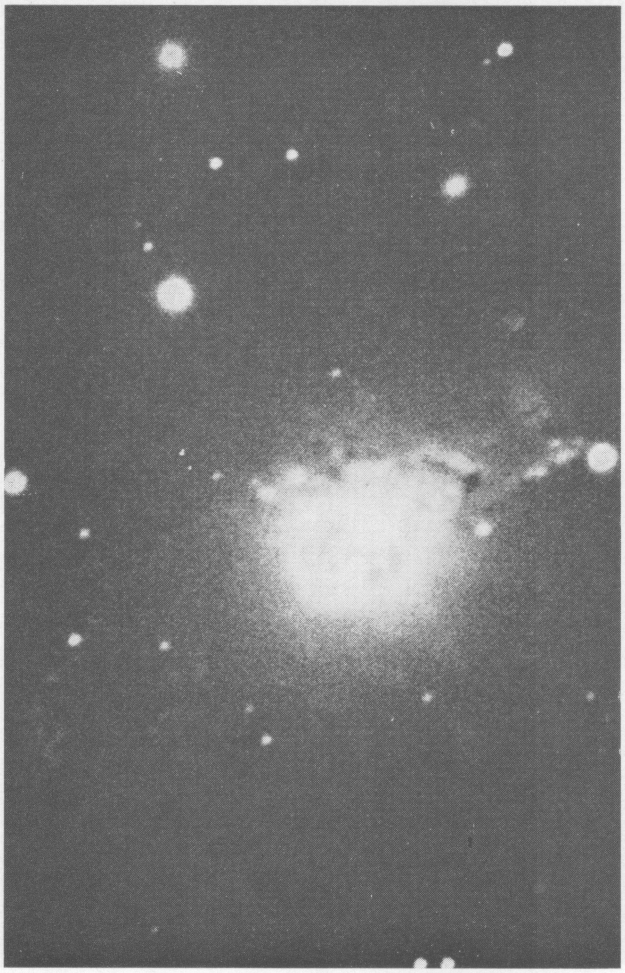
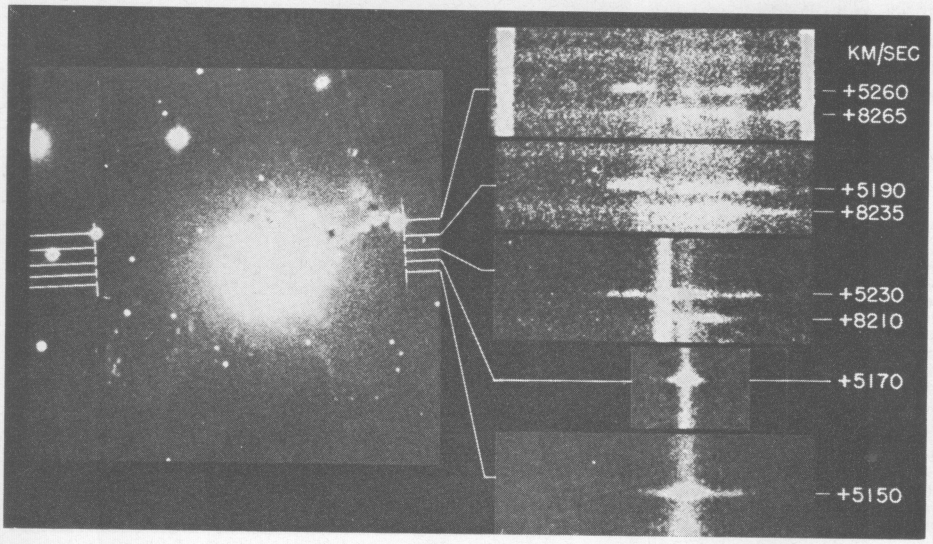


Fig. 4. NGC 1275 (no. 1275 van Dreyer's zg. „New General Catalogue" van nevels en sterrenhopen) ligt in een cluster van sterrenstelsels. NGC 1275 is een stelsel van sterren en interstellair gas waarin ongeveer 5 miljoen jaar geleden een „explosie" begonnen moet zijn; de „eruptie" zou voortgeduurd moeten hebben tot de huidige tijd. Gedurende deze periode zijn gasmassa's die in totaal ongeveer honderd miljoen maal de massa van de zon omvatten met zeer grote snelheid uitgeworpen. Het sterrenstelsel ligt op een afstand van ruim 200 miljoen lichtjaren.

de „stof" waaruit het ganse heelal tien miljard jaar geleden op explosieve manier ontstaan is? De Westerbork-telescoop zal moeten helpen hiernaar te zoeken. Of *dit* zoeken succes zal hebben, is een open vraag. De grote raadselen in de natuur worden zelden op zo'n directe wijze opgelost. Veelal is het het *on*verwachte, dat men tegenkomt bij het zoeken naar iets anders, dat de meest waardevolle nieuwe inzichten brengt. Het belangrijkste is dat men hulpmiddelen heeft waarmee men dieper binnen in de dingen kan kijken dan tot dusver het geval was, en niet minder dat er mensen zijn die de geest tot ontdekken in zich hebben; vooral jonge mensen, wier gedachten vrij genoeg zijn van het oude om de schemer van het nieuwe, nog nimmer gedachte, te kunnen grijpen.

Het heelal en zijn problemen vormen de achtergrond waartegen de grote nieuwe radiotelescoop moet worden gezien. Keren we ons nu tot het instrument, dan moeten we ons afvragen waarom er deze vorm en deze uitgestrektheid aan gegeven is.
Waarom zo groot? Om twee redenen. Ten eerste omdat de straling van de miljarden lichtjaren van ons weg liggende sterrenstelsels zo uiterst zwak is, en we deze dus op een heel groot oppervlak moeten bijeengaren om haar te kunnen meten. Deze radiostraling is zó zwak dat de totale hoeveelheid die in een jaar door de Dwingeloo-telescoop van 25 meter middellijn verzameld wordt, net genoeg energie oplevert om een zaklantaarn één seconde te laten branden.
Ten tweede moet de radiotelescoop een grote uitgestrektheid hebben, omdat de fijnheid van de details die we kunnen waarnemen evenredig is met de afmeting van de telescoop (zie de volgende artikelen).
Wat de fijnheid van nog te onderscheiden details betreft, is het bij een gewone radiotelescoop nogal droevig gesteld. Met de na de oorlog door de Duitsers achtergelaten radarspiegel van $7^1/_2$ meter diameter, waarmee in Nederland de eerste kaart van de spiraalstructuur van het Melkwegstelsel gemaakt werd, konden bij de gebruikte golflengte van 21 cm geen details worden waargenomen, kleiner dan 2° aan de hemel, dus kleiner dan viermaal de diameter van zon en maan.
Met de 25-meter radiotelescoop in Dwingeloo werd dit ongeveer vier maal beter. Hoewel nog gebrekkig, was deze gezichtsscherpte voldoende om veel nieuws te leren over het ons omringende Melkwegstelsel. Voor het onderzoek van *andere* stelsels is dit echter ten enenmale onvoldoende. Zelfs nabijgelegen stelsels zijn in de

Fig. 5. De verdubbeling der spectraallijnen in het aan de rechterkant afgebeelde spectrum toont dat ongeveer de helft van het gas in NGC 1275 zich met een snelheid van 3000 km per seconde verwijdert van het sterrenstelsel en de daarin achtergebleven andere helft van het gas.
De opnamen voor fig. 4 en 5 zijn gemaakt met de 5-meter telescoop op Mount Palomar.



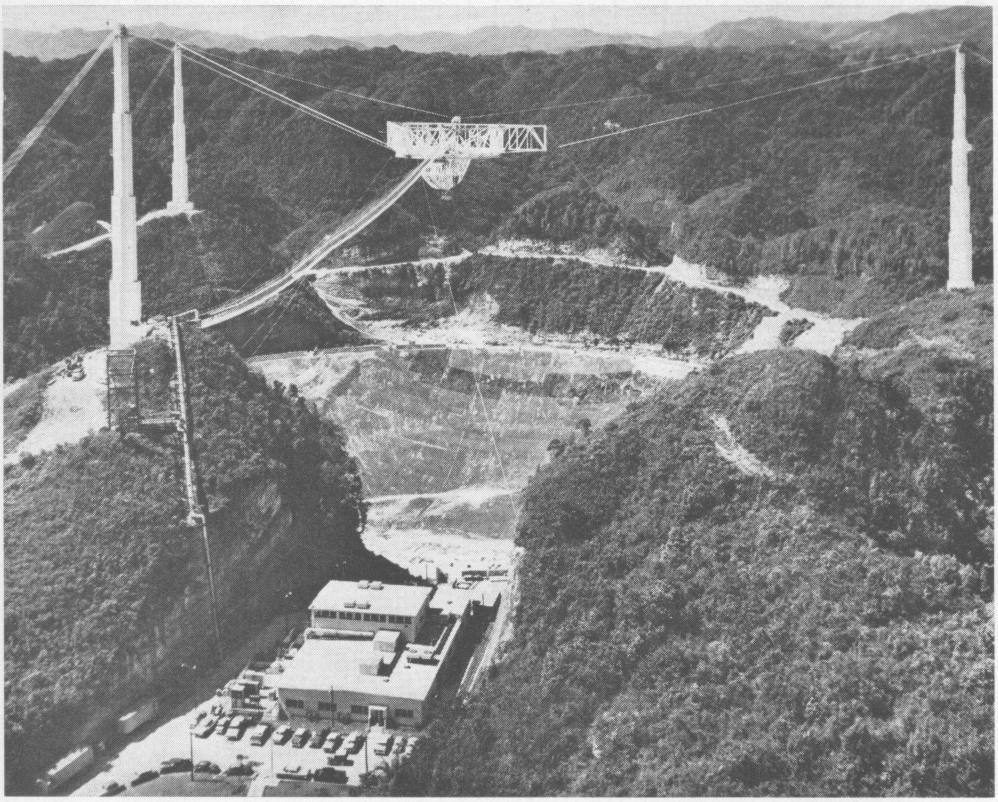


Fig. 6. De vaste radiotelescoop in Arecibo op Porto Rico, gebouwd in een dal dat de natuurlijke vorm van een boloppervlak had. Het gevaarte dat aan lange kabels erboven hangt, in het brandvlak van de telescoop, bevat de eigenlijke antenne en een deel van de ontvanger.

Dwingeloo-telescoop vervaagd tot een vormloos klompje.
Om met succes te kunnen doordringen in het heelal buiten ons Melkwegstelsel is een „gezichts"scherpte nodig die tenminste honderd maal beter is.

Men kan nu enerzijds streven naar grotere parabolische reflectoren. Na de in-gebruik-stelling van de Dwingeloo-telescoop in 1956 zijn verschillende veel grotere telescopen gebouwd. Het eerst de 75-meter telescoop in Jodrell Bank bij Manchester, het laatst de telescoop van 100 meter middellijn van het Max-Planck-Instituut voor radio-astronomie in Bonn, die in de loop van dit jaar voltooid zal worden.
De allergrootste in deze familie is de vaste telescoop in Arecibo, op Porto Rico, waarvoor gebruik gemaakt is van een komvormig dal, dat juist ongeveer de goede vorm had. Op de bodem van dit dal is metaalgaas aangebracht, op zodanige wijze dat het oppervlak één reusachtige paraboloïde vormt van 300 meter doorsnede. Niettegenstaande het bezwaar dat in dit geval de telescoop niet bewogen kan worden, behalve dan door de draaiïng van de aarde, en dat hij dus slechts een beperkt deel van de hemel kan waarnemen, heeft hij vooral door de grote hoeveelheid straling die hij verzamelen kan, belangrijke nieuwe onderzoekingen mogelijk gemaakt.

Het scheidend vermogen van een telescoop hangt niet alleen af van zijn diameter, maar ook van de golflengte waarbij gewerkt wordt, en wel is het evenredig met de verhouding tussen golflengte en diameter. De betekenis van een radiotelescoop wordt daarom mede bepaald door de kortste golflengte waarbij hij kan werken. Deze golflengte is weer bepaald door

# Some technical data

*The Synthesis Radio Telescope at Westerbork uses the technique of earth rotation aperture synthesis. It consists of an array of twelve 25 m diameter equatorially mounted parabolic reflectors, aligned along an East-West line. Ten of these are placed at fixed positions 143,991 m apart, while the other two are movable along a precision railway track of 290 m length at the Eastern end of the telescope. Each of these two movable antennae is combined with each of the fixed ones to yield simultaneous observations with 20 interferometers.*

*The reflectors have a stainless steel mesh surface, 8 mm mesh size formed by 0.8 mm wiring. The r.m.s. deviations from a perfect paraboloid are about 1 mm, and extreme care has been taken to make all dishes identical. The shortest usable wavelength will be near 3 cm. The pointing accuracy is about 0.01 of a degree. A very special effort has been made to position all individual elements as accurately as possible along an East-West line, and the first measurements indicate 3-dimensional r.m.s. deviations from the specified positions along a straight line around 2 mm. The orientation of the line itself seems to be about 3″ off the true East-West direction.*

*The reflectors are illuminated by a feed with two orthogonal dipoles, each connected to its own parametric amplifier. In all interferometers each dipole in one antenna is correlated with both dipoles in the other, thus yielding four complex correlation channels per interferometer. This provides for all polarization information of the received radiation.*

*The present receiver system operates at a frequency of 1415 MHz and has a system temperature of about 240°K. The bandwidth being 4 MHz this will yield a r.m.s. noise-level of about 0.9 milliflux units per synthesis beam in one 12 hour observation. The phase-accuracy is about 1°.5, which, together with the accuracy of the layout of the array, should make it possible to obtain absolute positions of point sources down to fractions of an arcsecond.*

*An on-line computer does the necessary delay steering, fringe stopping and data sampling and writes the data on magnetic tape. The off-line reduction takes place on the computer at Leiden University.*

*Future plans for receiver systems call for 6 and 50 cm continuum equipment and an autocorrelation 21 cm line receiver.*

de precisie waarmee het oppervlak de ideale paraboloïdevorm benadert. Onderstaande tabel geeft een vergelijking van enkele der grootste enkelvoudige telescopen.

| Plaats | Diameter | Minimale golflengte | Scheidend vermogen |
|---|---|---|---|
| Green Bank | 42 m | 1.5 cm | 1′.2 |
| Parkes | 64 m | 5 cm | 2′.7 |
| Jodrell Bank | 75 m | 20 cm | 10′ |
| Bonn | 100 m | 4 cm | 1′.3 |
| Arecibo | 300 m | 40 cm | 5′ |

Ter vergelijking met de getallen in de laatste kolom: de maan en de zon beslaan ongeveer een hoek van 30′ aan de hemel.

De mogelijkheid van radiowaarnemingen wordt behalve door de grootte van de telescoop bepaald door de gevoeligheid van de ontvangers. Deze is in het afgelopen decennium enorm toegenomen en daardoor is het meten bij centimetergolven, waar de straling veel zwakker is dan in het aanvankelijk meest gebruikte gebied van de metergolven, mogelijk geworden. Voor het radio-astronomisch onderzoek zijn echter metingen bij langere golven óók noodzakelijk. Zelfs de grootste reflectoren leveren daar slechts een scheidend vermogen dat geheel onvoldoende is voor het onderzoek der radiobronnen en het heelal. Voor dit doel heeft men telescopen van een geheel ander type nodig, die, zoals de Westerbork-telescoop, samengesteld zijn uit ver uit elkaar staande en toch samenwerkende afzonderlijke reflectoren.

In dit verband heeft de Australiër prof. Christiansen eens een vergelijking met grote zeilschepen gemaakt: de indrukwekkende enorme gevaarten van de enkelvoudige telescopen lijken op de prachtige laatste zeilschepen. Zij zullen echter onvermijdelijk in vele opzichten voorbijgestreefd worden door de minder spectaculaire *samengestelde* telescopen.

De werking van zo'n samengestelde telescoop is in volgende artikelen beschreven. Het beginsel werd voor het eerst toegepast door Christiansen („Chris-cross") bij het zonne-onderzoek. Later werd de kruisantenne, in een vorm die eveneens in Australië werd ontwikkeld door Mills, een belangrijk instrument voor het onderzoek van de Melkweg en van zwakke radiobronnen. Het meest baanbrekende werk met een samengestelde antenne werd echter gedaan in Cambridge, Engeland, door Ryle en zijn medewerkers.

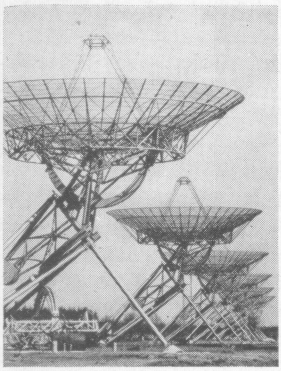
In hun zg. „one-mile" telescoop wordt, met slechts drie reflectoren, van het veld aan de hemel dat door elk van de telescopen „gezien" wordt (ongeveer 1° in doorsnede) een volledig beeld opgebouwd, met een scheidend vermogen van ongeveer 20 boogseconden bij een golflengte van 21 cm. Onder de stimulerende leiding van Ryle zijn in Cambridge een reeks van de prachtigste ontdekkingen gedaan.
Het principe van de Westerbork-telescoop (beschreven in het artikel van Raimond) is hetzelfde als van het instrument in Cambridge. De twee instrumenten hebben dezelfde lengte en daardoor hetzelfde scheidend vermogen, maar de Westerbork-telescoop is een factor tien sneller, kan door het grotere oppervlak van elk van zijn reflectoren tot zwakkere objecten doordringen, en geeft bovendien de voor het radio-astronomisch onderzoek zo essentiële mogelijkheid om de polarisatie van de opgevangen straling te meten.
Uiteraard heeft in de laatste jaren het principe van de synthese ook elders ingang gevonden. Belangrijk werk met een synthese-instrument is o.a. ook gedaan aan de radio-astronomische afdeling van het California Institute of Technology, met drie verrijdbare reflectoren, waarvan één 40 en de beide andere 27 meter doorsnede hebben. Op het ogenblik bestaat er echter geen andere „array" van radiotelescopen die in omvang en in grootte van spiegels vergelijkbaar is met die in Westerbork.

Plannen en bouw van de Westerbork-telescoop zijn uitgewerkt onder verantwoordelijkheid van de in 1949 opgerichte Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg, waarin al het radio-astronomisch onderzoek in Nederland samengebundeld is. Naast de bij dit werk betrokken sterrenwachten zijn in het bestuur ook de PTT, het KNMI en Philips vertegenwoordigd.
De Stichting wordt gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek (ZWO).

Voor het grote project werden speciale fondsen toegewezen door het toenmalige Ministerie van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen. Aan ontwerp en bouw van het instrument hebben velen hun beste krachten gegeven. De grootste lof voor het welslagen van het instrument komt echter toe aan de twee ingenieurs die gedurende het ontwerp en de bouw de centrale verantwoordelijkheid gedragen hebben, nl. ir. B. G. Hooghoudt en prof. ir. C. A. Muller.

Van het begin af heeft het project een internationale inslag gehad, en hoewel het aanvankelijke plan om het grote instrument (dat toen Benelux Cross Antenna Project heette) als een gezamenlijk Belgisch-Nederlands project uit te voeren tenslotte geen doorgang kon vinden, hebben vele buitenlanders eraan meegewerkt, o.a. de Belgische ingenieur Jean Casse, en de Zweedse astronoom Jan Högbom die blijvende functies bij de Stichting vervullen, terwijl gedurende beperkte perioden zes Australische ingenieurs, drie Amerikanen en een Indiër aan het ontwerp deelgenomen hebben.
Ook thans zijn er een aanzienlijk aantal buitenlandse radio-astronomen bij betrokken, en het ziet er naar uit dat het unieke instrumentarium vele astronomen voor kortere of langere duur naar Nederland zal trekken. Zo zal de telescoop, naar wij hopen, behalve zijn missie in het heelal ook een missie op aarde hebben, voor het verder bevorderen van de samenwerking van onderzoekers over de gehele wereld.

Fig. 7. Een projectbespreking in 1962. V.l.n.r. de schrijver van dit artikel, Dr. Erickson (Verenigde Staten), Dr. Högbom (Zweden, nu verbonden aan de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg en Ir. Hooghoudt.



**Ernst Raimond,**
Radiosterrenwacht Westerbork

## de Synthese Radiotelescoop te Westerbork

# het principe

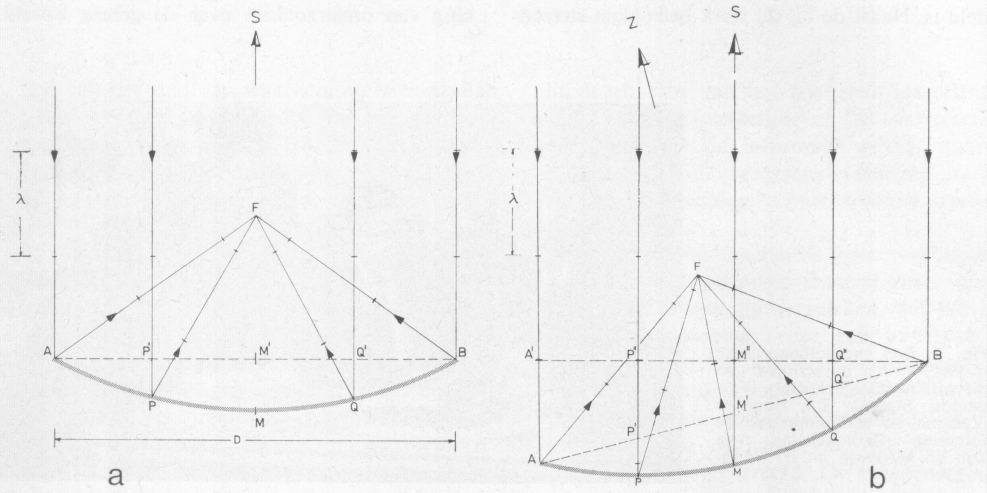
De kortste afstand tussen twee nog afzonderlijk waar te nemen objecten wordt bepaald door de verhouding tussen golflengte van de betrokken straling en de diameter van de telescoop. De synthese-telescoop stelt ons in staat een gigantische parabolische spiegel voor een fractie van de prijs na te bootsen.

### Waarom een grote radiotelescoop?

De doorsnede van optische kijkers varieert tussen enkele centimeters voor de eenvoudige kijker van de sterrenkundig amateur tot 5 meter voor de grootste kijker ter wereld: de 200 inch telescoop op Mount Palomar. Bij radiotelescopen denkt men echter aan iets geheel anders: de kleintjes zijn tenminste een paar meter groot en er zijn er enkele, zoals die van Jodrell Bank, die zo'n 70 of 80 meter groot zijn.

Doordat de golflengte van de radiostraling 100.000 maal zo groot is als die van de op-

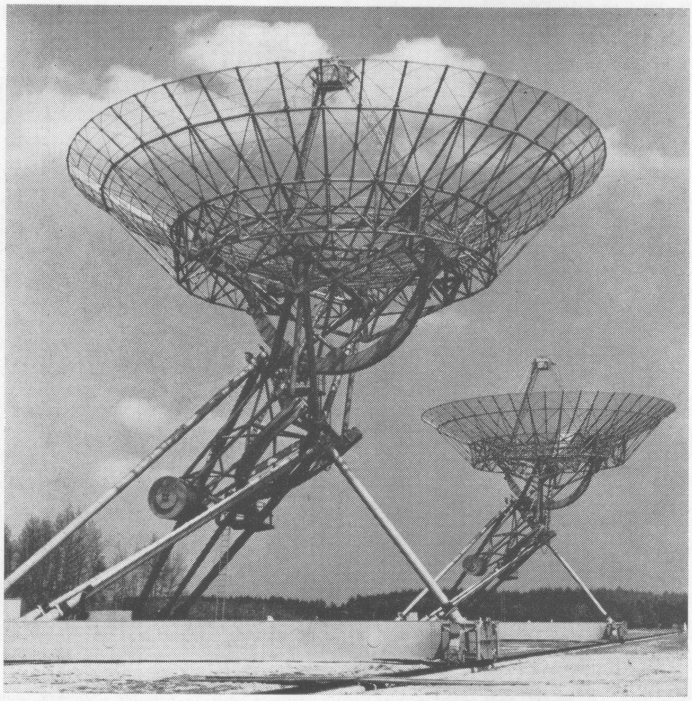
Fig. 1. De beeldvorming van een enkelvoudige telescoop. (a) Straling evenwijdig aan de optische as van de telescoop; de golflengte van de straling komt overeen met de afstand tussen de streepjes; de straling en dus ook de streepjes planten zich voort met de lichtsnelheid. Langs alle wegen komt de straling in gelijke fase aan in het brandpunt F (de afstand van de laatste streepjes tot F is langs alle wegen gelijk). (b) De telescoop is over een hoek $\alpha$ gedraaid zodanig dat $A'A = \lambda$ en dus $M''M' = \lambda/2$. De weglengte A'AF is een halve golflengte langer dan M''MF; evenzo is $P''PF - Q''QF = \lambda/2$ etc., zodat de straling teruggekaatst via de linkerhelft van de spiegel in tegenfase is met de door de rechterhelft teruggekaatste straling.



tische straling, is de scherpte van het met een radiotelescoop van vijf meter verkregen beeld ongeveer 100.000 keer zo slecht als die van een even grote optische telescoop. Om de beeldscherpte (het scheidend vermogen) van de telescoop te verbeteren, moeten we hem groter maken.

Figuur 1 is een schematische afbeelding van een telescoop. Het mag zowel een optische als een radiotelescoop zijn. In het brandpunt F van de parabolische spiegel AB bevindt zich een detector voor de straling die daar door een spiegel wordt geconcentreerd. Deze detector kan bij een optische telescoop het oog zijn of een fotografische plaat. Bij een radiotelescoop gebruiken we een antenne als detector.

Laten we eens de gang volgen van de zich met de lichtsnelheid voortplantende straling met een golflengte $\lambda$, afkomstig van een astronomische bron S. De bron is heel ver weg, de stralenbundel is dus evenwijdig. Een eigenschap van deze evenwijdige bundel is, dat in een willekeurig vlak loodrecht op de bundel de straling (een golfverschijnsel) parallel trilt. Anders gezegd: in een vlak loodrecht op de bundel is de straling in gelijke fase. Laten we aannemen dat de telescoop gericht is op de bron (fig. 1a); het openingsvlak AB staat dan loodrecht op de stralenbundel en de hier aankomende straling is dus in gelijke fase. De parabolische vorm van de spiegel zorgt ervoor dat de afstanden AF, P′PF, Q′QF en BF allemaal gelijk zijn. Bij aankomst in F is de straling die teruggekaatst is door verschillende punten van de spiegel nog steeds in gelijke fase. Populair gezegd: alle in F aankomende stralen versterken elkaar omdat ze parallel trillen.

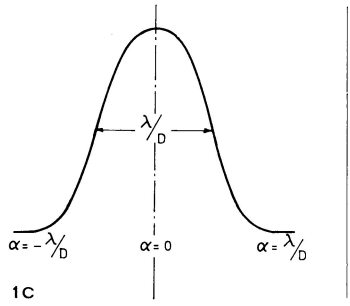


De verrijdbare telescopen hebben precies dezelfde constructie als de vaste op het onderste stuk na. Dit bestaat uit een stalen driehoekige wagen in plaats van een betonnen fundament. De rails waarop de wagens rijden is recht en vlak geslepen binnen een nauwkeurigheid van 0,75 mm.

Beschouw nu het geval dat de telescoop niet meer op de bron S gericht is, maar gedraaid over een hoek $\alpha$ zodanig dat de afstand A′A juist een hele golflengte $\lambda$ is; de telescoop is nu op het punt Z gericht (fig. 1b). We zien nu dat de straling langs het gedraaide vlak AB niet meer in gelijke fase is. Integendeel, omdat $M''M' = \lambda/2$ is, is de straal die in het midden M′ binnenkomt, precies in tegenfase met de straal die bij A binnenkomt. In het brandpunt F zullen deze stralen dus ook in tegenfase zijn.

Hetzelfde geldt voor twee punten P' en Q' die op gelijke afstanden van A respectievelijk M' liggen, enz. Met andere woorden: de linkerhelft van de spiegel werkt in tegenfase met de rechterhelft van de spiegel. In F werkt de ene helft van de opgevangen straling de andere helft tegen. Het resultaat is dat er niets wordt gedetecteerd.

We hadden nu een hoek $\alpha$ gekozen, zodanig dat het stukje A'A juist gelijk was aan een gehele golflengte $\lambda$. De sinus van deze hoek (en omdat de hoek klein is, is dit vrijwel gelijk aan de hoek in radialen) is dus gelijk aan $\lambda/D$; D is de doorsnede van de parabolische spiegel.
Het is duidelijk dat voor een hoek kleiner dan $\lambda/D$ de ene helft van de spiegel niet in volledige tegenfase is met de andere helft maar ook niet in gelijke fase. In het brandpunt zal dus niet de volledige straling van S worden gedetecteerd, maar een gedeelte ervan.



1c

Figuur 1c geeft een grafische voorstelling van de gedetecteerde straling bij draaiïng van de spiegel naar verschillende hoeken $\alpha$. Voor $\alpha = 0$ vertoont de kromme een maximum. Voor $\alpha = \lambda/D$ radialen (1 radiaal = 57°.296) is de gedetecteerde straling nul. De breedte van de kromme, op de hoogte waar de gedetecteerde straling de helft is van het maximum, heet de *bundelbreedte* van de telescoop. Deze is ongeveer gelijk aan $\lambda/D$ radialen. Dit is ook de kleinste hoek waaronder deze telescoop twee objecten nog van elkaar gescheiden kan zien. Hoe kleiner $\lambda$ en hoe groter D, des te kleiner is deze hoek, en des te beter is dus de beeldscherpte.

De gehele bovenstaande redenering geldt voor de straling van allerlei golflengtes. Het grote verschil in beeldscherpte komt te voorschijn als we de golflengte van de verschillende soorten straling gaan invullen. Het zichtbare licht, het „materiaal" van de optische astronoom, heeft golflengtes tussen ca. 1 mm en 10 meter. Laten we 20 cm (0,2 meter) als een representatieve golflengte nemen. Tabel 1 geeft de beeldscherpte van enkele optische en enkele radiotelescopen.
Het is hieruit volkomen duidelijk: Als we met een radiotelescoop een beeldscherpte (scheidend vermogen) willen bereiken dat ook maar enigszins vergelijkbaar is met dat van optische instrumenten, dan moeten we de radiotelescoop zeer groot, kilometers groot maken. In principe zouden we er ook aan kunnen denken bij een kortere golflengte te gaan werken. Dat levert nog wel wat winst op. Toch kan dat niet echt: We willen immers informatie over bronnen krijgen op verschillende golflengtes, teneinde ze te kunnen classificeren etc. (zie ook het artikel van Van der Laan en Van Woerden). De afmeting van de telescoop is dus het enige wat we in de hand hebben.

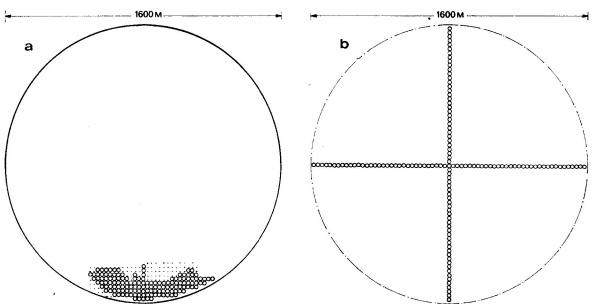


Fig. 2. Verschillende mogelijkheden om een 1600 meter grote radiotelescoop te realiseren. (a) Het gehele oppervlak van de denkbeeldige grote telescoop gevuld met 3200 kleine radiotelescopen. (b) Een kruisantenne bestaande uit 128 radiotelescopen van 25 meter.

| Tabel 1 | D | $\lambda$ | $\lambda/D$ (radialen) | beeldscherpte (boogminuten) |
|---|---|---|---|---|
| ongewapend oog | 5 mm | 0,001 mm | 0,000 2 | 0,7 |
| 200 inch kijker (Mount Palomar) | 5000 mm | 0,001 mm | 0,000 000 2 | 0,0007 |
| 5 m radiotelesc. | 5 m | 0,2 m | 0,04 | 140 |
| 25 m radiotelesc. (Dwingeloo) | 25 m | 0,2 m | 0,008 | 28 |
| 1600 m radiotelescoop | 1600 m | 0,2 m | 0,000 12 rad | 0,4 |

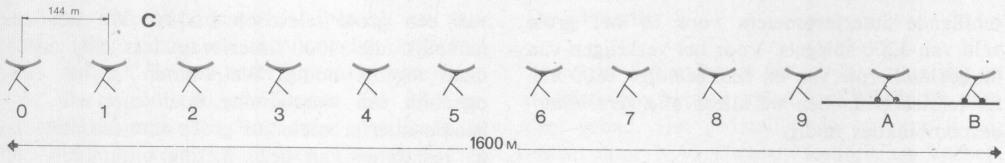
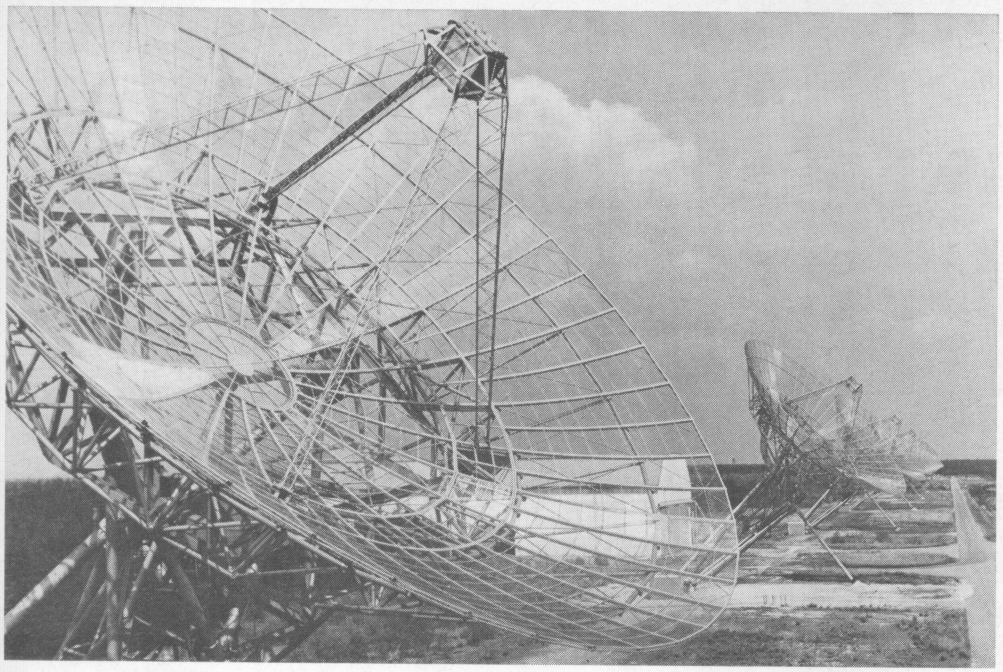



Fig. 2c. De synthese radiotelescoop te Westerbork: twaalf langs een oost-west lijn opgestelde 25-m telescopen; tien ervan staan vast, twee zijn verrijdbaar De schaal van fig. 2c is ruim 3½ maal die van fig. 2a en b.

**Een synthese radiotelescoop**

Het is duidelijk dat een parabolische spiegel met een doorsnede van meer dan een kilometer technisch en financieel niet te realiseren is. Het wordt nog moeilijker als we deze spiegel dan ook nog op allerlei punten aan de hemel willen kunnen richten.
Gelukkig is er een oplossing voor dit probleem. Men kan de (denkbeeldige) grote telescoop verdelen in elementen die wel te fabriceren zijn, bijvoorbeeld radiotelescopen van 25 meter doorsnede (figuur 2a).
De door alle kleine spiegels gedetecteerde straling moeten we dan via kabels bijeenbrengen op een centraal punt om vervolgens de combinatie van alle ontvangen straling als geheel te verwerken. Toch is er nog een groot bezwaar: Weliswaar kunnen we op deze wijze technisch een grote telescoop met een doorsnede van bijvoorbeeld 1600 meter bouwen, maar kostbaar is dit plan nog wel. Er zijn namelijk meer dan 3200 25 meter spiegels voor nodig!
Ook uit deze impasse is gelukkig een uitweg: We kunnen het grote veld met de 3200 spiegels ook opvatten als een veld met een groot aantal (ca. 10 miljoen) combinaties van telkens twee spiegels. Ieder van die combinaties van telkens twee spiegels heet een interferometer; de verbindingslijn tussen de spiegels is de basislijn van de interferometer. Zeer vele van die interferometers leveren gelijke resultaten op, omdat hun basislijnen dezelfde lengte en oriëntatie hebben. Dit is in figuur 2a gemakkelijk na te gaan. Er komen „slechts" 4000 wezenlijk ver-

De synthese radiotelescoop gezien vanuit het westen. Telescoop 0 op de voorgrond.

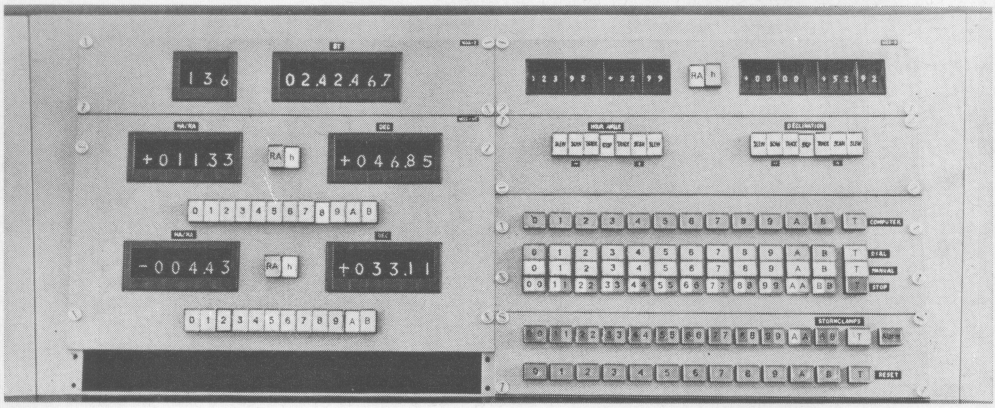


schillende interferometers voor in het grote veld van 3200 spiegels. Voor het verkrijgen van de beeldscherpte van de denkbeeldige 1600 meter telescoop hebben we alleen alle *verschillende* combinaties nodig.

Wat zijn we nu met deze redenering opgeschoten? In plaats van 3200 spiegels hebben we nu 4000 interferometers (paren van telkens 2 spiegels) nodig. Deze 4000 interferometers kunnen we echter maken met veel minder dan 3200 spiegels. Als we ongeveer 64 spiegels langs een 1600 meter lange oost-west lijn en ook nog eens 64 langs een even lange noord-zuid lijn in een kruisvorm opstellen (zie figuur 2b), dan kunnen we de vereiste 4000 interferometers ook maken door alle spiegels van de noord-zuid arm te combineren met alle spiegels van de oost-west arm en bovendien binnen de beide armen zelf ook nog eens alle verschillende combinaties te vormen.
Nog steeds hebben we zo'n 130 telescopen met een diameter van 25 meter elk nodig voor deze „kruisantenne". De bouw ervan zal dus nog steeds kostbaar zijn en bovendien veel tijd vergen.

We kunnen nu echter nog een heel belangrijke stap naar een goedkopere en snellere realisatie van een grote telescoop maken. We hebben namelijk die 4000 interferometers niet allemaal tegelijk nodig! We kunnen op het ene ogenblik een waarneming doen met een bepaalde interferometer of groep interferometers, de resultaten van deze meting onthouden op ponsband, ponskaarten of magneetband en op een ander ogenblik een meting doen van hetzelfde object, met interferometers met andere basislijnen. Dit kunnen we nog vele malen herhalen.
Wanneer de metingen van dit object met alle 4000 interferometers gedaan zijn, brengen we alle resultaten bijeen en leiden er de gedetailleerde helderheidsverdeling van het object uit af. Als zeer extreem geval kunnen we dus toe met slechts twee radiotelescopen, waarvan we er één op alle gewenste afstanden en oriëntaties ten opzichte van de ander kunnen plaatsen. We moeten die telescoop dan voor één complete meting wel 4000 keer verplaatsen!
Uiteraard is deze methode van waarnemen alleen te gebruiken als het waar te nemen object een constante helderheid heeft. Immers, als er helderheidsvariaties voorkomen tussen twee of meer waarnemingen met verschillende combinaties van telescopen, dan is het onmogelijk later uit te maken of het verschil in resultaat van de verschillende metingen het gevolg is van

Een detail van de bedieningsconsole uit de bedieningsruimte van de foto rechts.
Linksboven: de datum geteld vanaf 1 januari en de sterretijd in uren, minuten en seconden 02h42m46s.6. Daaronder: de positie-indicatoren van de telescopen in uurhoek (HA) of rechte klimming (RA) en declinatie (DEC). Met behulp van drukknoppen kan worden gekozen van welke telescoop de positie zichtbaar wordt (de getallen 0,1.....9 slaan op de vaste telescopen, de letters A en B op de verrijdbare).
Rechtsboven: duimwielschakelaars voor het instellen van een positie waarnaar de telescopen automatisch bewegen wanneer de knop DIAL is ingedrukt.
Daaronder: knoppen voor het kiezen van een snelheid en richting van beweging in uurhoek en declinatie (SLEW = 18°/min, SCAN = instelbare snelheid tussen 0°.12/min en 0°.5/min, TRACK = 0°.25/min). Alleen de telescopen waarvan de knop MANUAL is ingedrukt reageren op deze snelheden.
Daaronder: keuzeknoppen om een selectie van telescopen of alle telescopen (T) via de COMPUTER, met behulp van de duimwielschakelaars (DIAL) of met de snelheidsknoppen (MANUAL) te bedienen. De knoppen STOP spreken voor zichzelf. De stormklampen worden gebruikt om bij harde wind de beweging van de telescopen te blokkeren. Met behulp van de RESET knoppen kunnen de positie-indicatoren op het juiste punt op nul gezet worden.



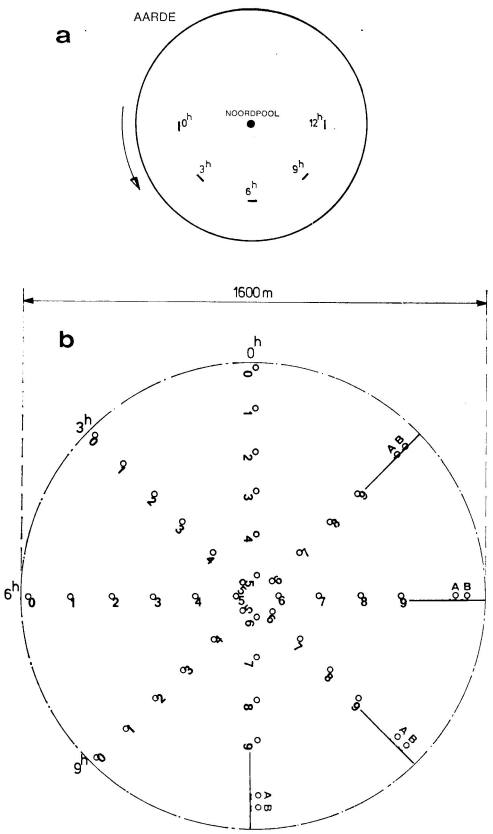
De bedieningsruimte van waaruit de telescopen worden bestuurd. Op de voorgrond de bedieningsconsole.

het gebruik van een andere combinatie van telescopen of van veranderingen in de helderheid van het object. Gelukkig is de helderheid van verreweg de meeste radiobronnen niet of hoogstens zeer langzaam variabel.

De hierboven geschetste methode van waarnemen, waarbij gebruik wordt gemaakt van in het algemeen op verschillende tijdstippen verkregen resultaten van interferometers, met basislijnen van verschillende lengtes en oriëntaties, wordt de *synthesemethode* genoemd.
Een radiotelescoop waarvan de werking op dit principe berust, heet daarom een *synthese-radiotelescoop*. Het meetresultaat van een (denkbeeldige) zeer grote radiotelescoop wordt hier samengesteld (gesynthetiseerd) uit de resultaten van een aantal kleinere elementen.

**De Westerbork synthese radiotelescoop**

Figuur 2c geeft schematisch weer hoe de Nederlandse synthese-telescoop eruit ziet. Hij bestaat uit twaalf elementen langs een lijn die precies oost-west loopt. Ieder element is een conventionele radiotelescoop met een spiegeldoorsnede van 25 meter. Tien van de twaalf elementen (genummerd 0 tot en met 9) staan op vaste fundamenten op onderlinge afstanden van 144 meter. De twee overige elementen (aangeduid met de letters A en B) zijn verplaatsbaar langs een 300 meter lange railbaan.
In principe zou het mogelijk zijn ieder van de twaalf elementen met ieder van de andere elf elementen te combineren tot een interferometer, en zo 66 interferometers te verkrijgen. Dit wordt echter niet gedaan, omdat slechts 30 van de genoemde 66 interferometers verschillende basislijnen hebben. De andere 36 combinaties komen ook al een keer voor in de eerste groep van 30.
Om praktische redenen worden in Westerbork toch ook niet 30 interferometers tegelijk gebruikt maar slechts 20, namelijk alleen de combinaties van ieder van de twee verrijdbare telescopen met ieder van de tien vaste. Op deze manier krijgen we tussen de telescopen 9 en A een interferometer met een kleine basislijn van zeg a meter. De combinaties van A met de andere negen telescopen leveren dan interferometers met basislijnen van a + 1 × 144, a + 2 × 144 en ... a + 9 × 144.
Evenzo, als de afstand van B tot 9 b meter is, komen daaruit afstanden van b, b + 1 × 144, b + 2 × 144.... b + 9 × 144 m. Aangezien a en b variabel zijn, door het verrijden van de telescopen A en B, kunnen we op deze manier dus het volle scala van basislijnen krijgen tussen ongeveer 30 meter en 1600 meter.
We hebben nu wel een hele reeks afstanden,




Boven: Fig. 3. (a) De Westerbork synthese telescoop (aangeduid door een streepje) gezien vanuit een ver afgelegen punt op het verlengde van de rotatie-as van de aarde. De stand van de oost-west lijn verandert in de loop van twaalf uur voortdurend van richting. (b) De twaalf telescopen te Westerbork gezien vanuit hetzelfde punt en geprojecteerd op een denkbeeldige 1600-m telescoop op vier tijden telkens drie uur later. Vanwege de duidelijkheid zijn de posities bij 12h, welke wel in figuur (a) voorkomen, hier weggelaten. De verrijdbaarheid van telescopen A en B geeft de mogelijkheid alle in de denkbeeldige telescoop voorkomende **verschillende** interferometers te vormen (vergelijk ook figuur 2a en de tekst).

maar nog niet allerlei oriëntaties. In de denkbeeldige grote telescoop komen immers niet alleen oost-west combinaties voor, maar ook noord-zuid en allerlei andere richtingen. Toch kunnen we die verschillend georiënteerde interferometers in Westerbork produceren, omdat de hele telescoop zich op de, éénmaal per dag in de ruimte ronddraaiende, aarde bevindt en de objecten die we willen waarnemen niet aan die rotatie meedoen.

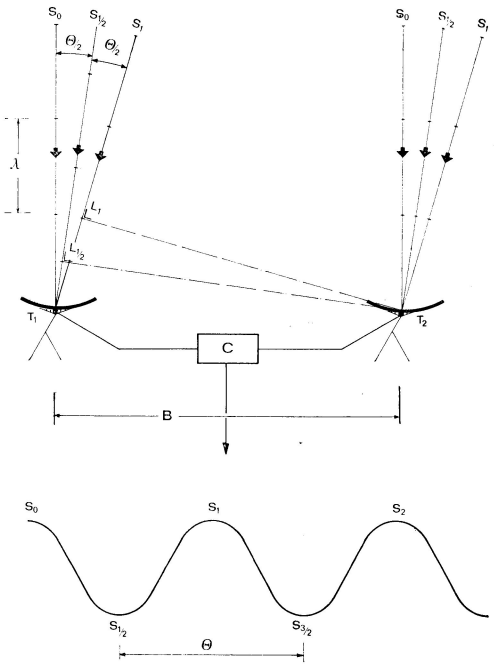
Figuur 3a geeft een beeld van de aarde en de voor dit doel wat te groot getekende synthese-telescoop, gezien uit een punt in de ruimte ergens op het verlengde van de draaiïngsas van de aarde. De gehele oost-west georiënteerde telescoop roteert in de loop van een dag een keer volledig om de aardas. Dat de telescoop door zijn afstand ten opzichte van de aardas bij die draaiïng niet op zijn plaats blijft, doet niet ter zake: de waar te nemen objecten zijn zo ver weg, dat deze verplaatsing volkomen verwaarloosbaar is.

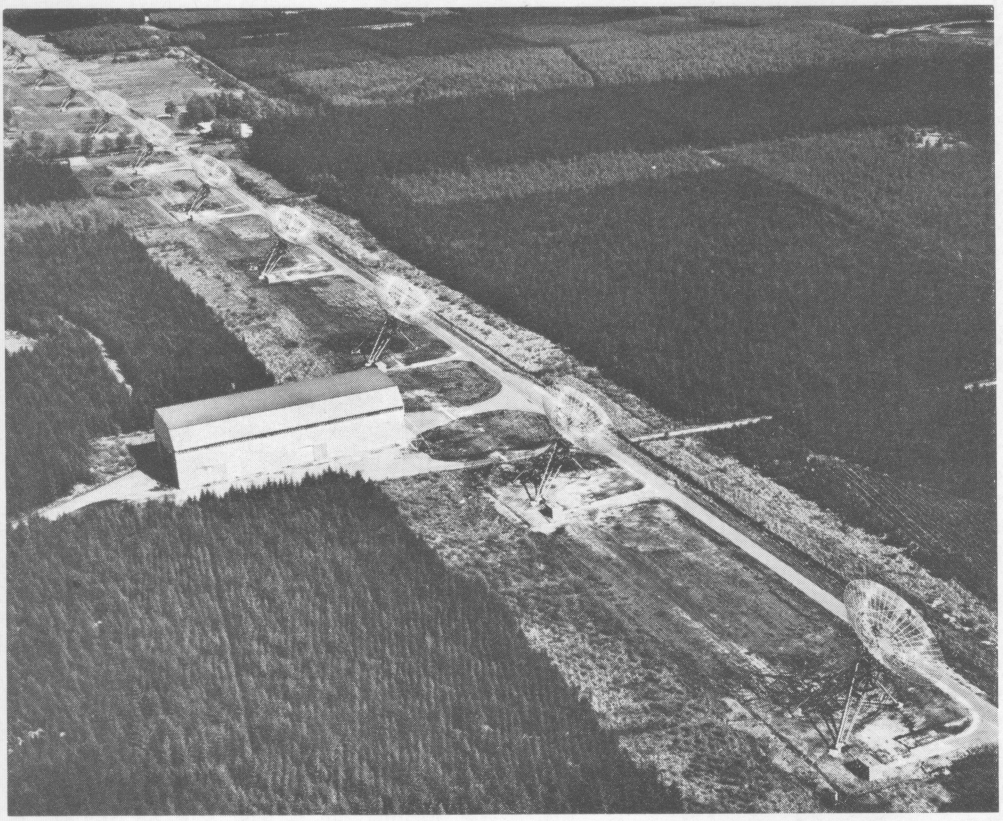
Om van een gebied aan de hemel een beeld te verkrijgen met een scherpte als die van een heel grote telescoop, moeten we dat gebied aan de hemel met de synthese-telescoop dus gedurende tenminste twaalf uur waarnemen.

Figuur 3b toont duidelijk hoe in de loop van twaalf uur een groot aantal van alle mogelijke combinaties in de denkbeeldige grote telescoop worden gerealiseerd. Door het drie keer herhalen van deze meting met verschillende plaatsingen van telescopen A en B, en dus verandering van de stralen van de cirkels, kunnen we het geheel compleet maken. Een volledige meting van een gebiedje aan de hemel kost dus $4 \times 12$ uur $= 48$ uur waarneemtijd.

We moeten dus wel betalen met waarneemtijd

Fig. 4. Een interferometer. Zie tekst voor verklaring.





Luchtfoto radiosterrenwacht Westerbork. Twaalf radiotelescopen, ieder met een spiegel van 25 meter doorsnede, vormen te zamen de synthese radiotelescoop. De twee verrijdbare telescopen zijn links-boven op de foto aan het uiterste oostelijke eind van de lijn te zien. Op de voorgrond de hal waarin de telescopen zijn geassembleerd. Het gebouw, waarin zich de bedieningsconsole, de computer en het centrale deel van de ontvanger bevinden, staat ten noorden van de rij tussen de zesde en de zevende telescoop. (Luchtfoto Aerophoto Eelde).

wat we economisch bezuinigd hebben door het bouwen van slechts twaalf telescopen in plaats van honderd of meer. Maar we bereiken er ons doel mee: we kunnen op 20 cm golflengte details zien van ongeveer 25 boogseconden.
Als we, wat in de komende jaren zeker de bedoeling is, ook op 6 cm golflengte gaan waarnemen, kunnen we zelfs details van 8 boogseconden zien. Zoals we in de laatste paragraaf zullen zien, is het dikwijls ook niet nodig vier keer twaalf uur waar te nemen. Eén of twee keer is voldoende als het waar te nemen object vrij klein van afmeting is. Bovendien is het verlies aan waarneemtijd ook weer niet helemaal zo groot als het op het eerste gezicht lijkt. In de bundel van de 25 meter spiegels van de synthese-telescoop vangen we in één keer alle straling uit een gebiedje met een diameter van ca. 30 boogminuten (zie tabel 1). Binnen dit gebied krijgen we alle fijne details door de combinatie van alle waarnemingen die gedurende 4 x 12 uur gedaan zijn.
Onze denkbeeldige enkelvoudige telescoop van 1600 meter doorsnede daarentegen zou een bundeltje hebben met een diameter van slechts 25 boogseconden. Om de helderheidsverdeling te meten over een gebiedje van de hemel met een doorsnede van 30 boogminuten, zou het nodig zijn dit gehele gebied met een oppervlak van meer dan 4000 maal het oppervlak van de doorsnede van de bundel geheel af te tasten. Dit zou toch ook tenminste enkele uren waarneemtijd vergen.

**Hoe komt de synthese nu echt tot stand?**

In de vorige paragraaf hebben we aannemelijk gemaakt dat het mogelijk is om met twaalf 25

meter radiotelescopen, opgesteld langs een 1600 meter lange lijn, die met de aarde in de ruimte roteert, een resultaat te bereiken dat vergelijkbaar is met dat van een niet te verwezenlijken enkelvoudige telescoop van 1600 meter diameter. We hebben gezien dat we daarbij gebruik maken van twintig interferometers, combinaties van telkens twee telescopen. Op welke manier komen we nu in de praktijk, uitgaande van het meetresultaat van interferometers, tot een gedetailleerde helderheidsverdeling, binnen een gebiedje aan de hemel waarvan iedere 25 meter telescoop op zich zelf alleen de totale helderheid kan meten.
Alvorens hierop in te gaan, moeten we eerst bekijken op welke manier een interferometer werkt. We spreken daarbij alleen over het principe; de details van de interferometers in Westerbork worden in het artikel van Casse en Muller uitgebreid behandeld en nader toegelicht.

In figuur 4 is schematisch een interferometer weergegeven. Deze bestaat uit de telescopen $T_1$ en $T_2$ op een onderlinge afstand B (basislijn), die door middel van kabels zijn verbonden met een correlator C, waarin de signalen van de twee telescopen met elkaar worden gecombineerd. Straling met een golflengte $\lambda$, komend uit een richting $S_0$ loodrecht op de basislijn $T_1T_2$ van de interferometer, komt in gelijke fase aan op beide telescopen (vergelijk ook de eerste paragraaf).

Als we gezorgd hebben dat de kabellengte $T_1$ naar C en die van $T_2$ naar C aan elkaar gelijk zijn, dan zijn de signalen nog steeds in gelijke fase bij aankomst in C. De signalen zullen elkaar dus versterken. De door C afgegeven spanning is dus hoog. Straling echter die komt uit de richting $S_{1/2}$, die een kleine hoek, $\theta/2$ met $S_0$ maakt, zodanig dat er een halve golflengte verschil is tussen het punt $L_{1/2}$ (het voetpunt van de loodlijn uit $T_2$ op $S_{1/2}T_1$) komt niet in gelijke fase op de beide telescopen aan. Immers de straling is in fase langs de lijn $L_{1/2}T_2$, maar bij aankomst op $T_1$ is de fase juist tegengesteld aan die op $T_2$.
Getransporteerd langs dezelfde kabels zijn de signalen bij C ook in tegenfase en zij doven elkaar dus uit. De afgegeven spanning is nu dus laag. Draaien we de richting waaruit de straling komt nog over de hoek $\theta/2$ verder naar $S_1$ dan is er een hele golflengte verschil bij aankomst op $T_1$ en $T_2$ en de fasen zijn dus weer gelijk. Nog een hoek $\theta/2$ verder, en het

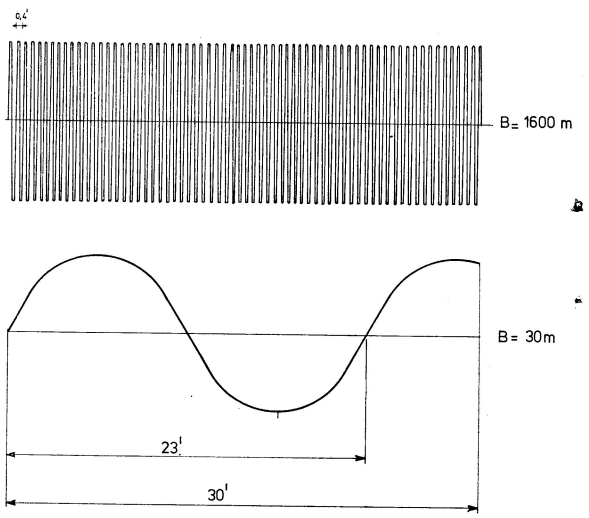



Fig. 5. Franjepatronen van interferometers met de langste in Westerbork bereikbare basislijn (1600 m) en met de kortst mogelijke basislijn (30 m). De perioden van beide patronen zijn aangegeven. Op een boogje van 0°.5 aan de hemel passen vele patronen van de lange en slechts iets meer dan één patroon van de korte interferometer. De golflengte van de straling is 20 cm.

verschil is anderhalve golflengte, en er is weer uitdoving.

De draaiïng van $S_0$ naar $S_{1/2}$, $S_1$, $S_{3/2}$ etc. is er één die automatisch plaatsvindt. Immers: alle hemelse objecten verplaatsen zich in de loop van de dag langs de hemel; ze komen in het oosten op en gaan, door het zuiden, in het westen onder, na 24 uur komen ze weer in het oosten op, enz. Dit is het gevolg van de draaiïng van de aarde. De snelheid waarmee de hoek $\theta$ dus verandert is 360° per 24 uur of wel 15° per uur of 0°.25/minuut.
Als we dus met de interferometer een radiobron volgen op zijn dagelijkse weg langs de hemel, dan zal de door de correlator C afgegeven spanning regelmatig variëren van hoog bij de richting $S_0$ naar laag $S_{1/2}$ etc.
We kunnen dus zeggen dat de bron met een vaste snelheid (0°.25/min) door een sinusvormig patroon beweegt, een patroon dat een franjepatroon wordt genoemd. Het franjepatroon heeft een bepaalde periode (de herhalingslengte). Deze periode komt overeen met de hoek $\theta$ in figuur 4. De grootte van de periode hangt af van de lengte van de basislijn B en de golflengte $\lambda$ in de driehoek $T_1T_2L_1$. Van figuur 4 kan men eenvoudig afleiden dat $\sin\theta = \lambda/B$. (Voor grote hoeken $\theta$ wordt het wat ingewik-

kelder, maar dat doet voor het begrip niet terzake). Voor een interferometer met een lange basislijn heeft het franjepatroon dus een kleine periode, voor interferometers met een korte basislijn is de periode van het franjepatroon groot.

In figuur 5 is dit geïllustreerd: Op een stukje hemel van een halve graad doorsnede passen vele franjes (ca. 70) van de lange basislijn van 1600 meter en slechts enkele (1,3) van een zeer korte basislijn van 30 meter lengte. Om nu duidelijk te maken, hoe we dit gebruiken om van een stukje hemel een gedetailleerd beeld te krijgen, gaan we enkele voorbeelden bekijken (zie figuur 6).

Alle voorbeelden bekijken we voor twee oost-west opgestelde interferometers, één met een basislijn van ongeveer 115 m, welke bij een golflengte van 20 cm een franjepatroon met 6 boogminuten/periode produceert, en één met een half zo lange basislijn, 57,5 m, waarvan de franjeperiode dan ook twee maal zo lang is, 12′. We beschouwen velden met een doorsnede van 30 boogminuten (het veld van één 25-m telescoop bij een golflengte van 20 cm) en we gaan telkens de registratie bekijken van beide interferometers gedurende één minuut, vanaf het ogenblik dat het midden van het veld door het zuiden gaat, dus vanaf het moment dat $\theta = 0$ (zie figuur 4).

De snelheid waarmee het veld door de patronen loopt is vast: 0°.25 of 15 boogminuten per tijdsminuut. In één minuut loopt het veld dus door 2,5 franjepatronen van de langste interferometer en door 1,25 franjepatroon van de kortste interferometer.

a) In het veld bevindt zich geen enkele bron. De registratie van beide interferometers vertoont geen franjepatroon (figuur 6a).
b) In het midden van het veld bevindt zich een puntvormige bron K met een intensiteit $I_K$. De registraties zijn weergegeven voor beide interferometers. De amplitude van de registraties zijn evenredig met $I_K$ en voor beide interferometers gelijk.
c) Er staat een puntbron L (intensiteit $I_L$) 6 boogminuten links van het midden van het veld. De amplitudes van beide interferometerregistraties zijn weer aan elkaar gelijk. De fase van de korte interferometer is echter anders geworden. De bron is juist een halve franjeperiode later door het patroon gegaan dan het midden van het veld. De fase van het geregistreerde patroon is dus over een halve periode verschoven. Voor de lange interferometer heeft verschuiving over een gehele periode plaatsgevonden, in het geregistreerde patroon is dit evenwel niet te zien.
d) De bronnen K en L staan beide in hetzelfde veld. Bovendien nemen we even aan dat $I_K = I_L$. Het geregistreerde patroon is nu dus de som van de patronen van de gevallen b en c. Voor de lange interferometer betekent dat een patroon met de dubbele amplitude en dezelfde fase. Voor de korte interferometer echter heffen de patronen van K en L elkaar juist op, aangezien de fasen tegengesteld zijn. Wat deze interferometer betreft, lijkt het veld dus wel leeg (geval a). Deze dubbele bron K + L is voor deze interferometer niet zichtbaar.
e) Dit geval lijkt op geval d, alleen is nu $I_L = 1/2\ I_K$. De geregistreerde patronen zijn nu eenvoudig af te leiden. De lange interferometer heeft een patroon met nog steeds dezelfde fase en een amplitude die $1\frac{1}{2}$ maal die van geval b is. De korte interferometer heeft nu een patroon met de halve amplitude van geval b en

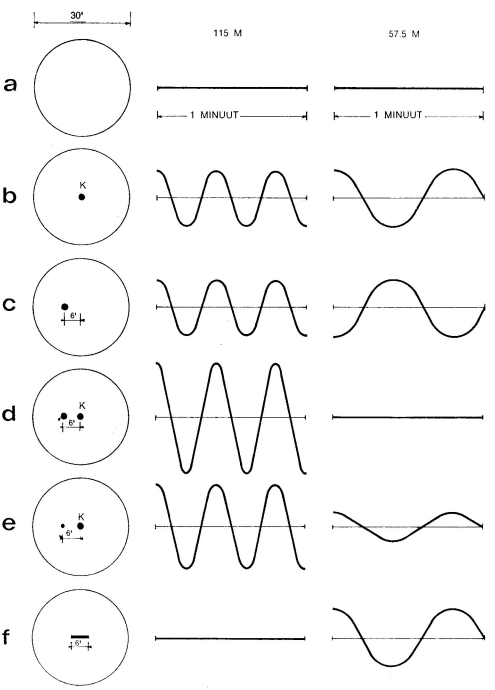



Fig. 6. Voorbeelden van franjepatronen geproduceerd bij waarneming van verschillende bronnen met behulp van een interferometer met een basislijn van 115 m en een met een basislijn van 57,5 m. De golflengte van de gemeten straling is 20 cm. Toelichting in de tekst.

een fase die gelijk is aan het geval b. De amplitude, die we ook wel de zichtbaarheidsamplitude noemen, is voor de lange interferometer dus drie keer zo groot als voor de korte.
f) Tenslotte een geval met een bron die zich met gelijkmatige helderheid $I = I_K$ uitstrekt over 6 boogminuten. Door deze bron op te vatten als een serie puntbronnen naast elkaar en door daarop een beredenering toe te passen gelijk aan die van geval d, is het nu duidelijk dat de lange interferometer, waarvan altijd één franjepatroon over de uitgestrekte bron past, nu niets van die bron zal zien. Voor de korte interferometer is hij wel zichtbaar.

Het aantal voorbeelden is eindeloos uit te breiden. De bedoeling was alleen de lezer er enig gevoel voor te geven dat verschillende structuren of helderheidsverdelingen binnen hetzelfde veld op interferometers met verschillende basislijnen heel verschillende patronen produceren. Een gecompliceerde helderheidsverdeling is altijd op te vatten als een verzameling puntbronnen van verschillende intensiteit. Omgekeerd moet het dus ook mogelijk zijn, met behulp van verschillende interferometers, resultaten af te leiden wat de helderheidsverdeling binnen het veld was.

We hebben in het bovenstaande alleen het ééndimensionale geval bekeken. We hebben echter bij de synthese-telescoop ook de andere dimensie beschikbaar, omdat de oost-west interferometers, zoals we eerder zagen, in de loop van de dag ten opzichte van het veld aan de hemel gedraaid worden. Het zal duidelijk zijn dat we de interferometers met de langste basislijnen nodig hebben om de kleinste details te kunnen onderscheiden. De kortere hebben we echter ook nodig, hetgeen goed wordt gedemonstreerd door vergelijking van de voorbeelden b en c: Uit de registratie van de lange interferometer viel niet uit te maken op welke plaats de bron stond, in het midden van het veld of 6 boogminuten ernaast; de kortere interferometer moest hier uitsluitsel geven.
Voor het afleiden van gecompliceerde helderheidsverdelingen over een veld hebben we dus de amplitude en de fase (de zichtbaarheidsamplitude en -fase) nodig van interferometers, met basislijnen die regelmatig oplopen van heel kort tot heel lang. Bovendien moeten deze basislijnen nog allerlei verschillende oriëntaties hebben, ten opzichte van het veld. Dit alles hebben we na een complete meting van 4 x 12 uur met de Westerbork synthese-telescoop inderdaad beschikbaar.

Het in deze periode verzamelde materiaal bestaat uit ca. 500.000 getallen, die via een computer van de radiosterrenwacht op magneetband zijn geregistreerd. De rekenkundige bewerking die de geregistreerde zichtbaarheidsamplituden en -fasen omzet in een helderheidsverdeling (fouriertransformatie) is in principe eenvoudig, maar zeer bewerkelijk. Het is dan ook ondenkbaar dat een instrument als de Westerbork synthese-telescoop zou kunnen functioneren, zonder dat de geregistreerde gegevens met een zeer snelle computer worden verwerkt.

In ons geval gaan alle op magneetbanden geregistreerde gegevens naar het rekencentrum van de Leidse universiteit, waar een IBM computer er diverse bewerkingen op uitvoert, volgens een programma van drs. W. N. Brouw. Deze computer is in staat meer dan 250.000 optellingen per seconde te verrichten. Toch hebben we, per dag waarnemen in Westerbork, ongeveer drie uur computertijd nodig.

**De verwerking van de gegevens door de computer**

Hoewel de hierboven vermelde fouriertransformatie een van de meest wezenlijke bewerkingen is die de Leidse computer moet uitvoeren, is het toch lang niet de enige. Alvorens we de helderheidsverdeling kunnen berekenen, moeten de „ruwe" waarnemingen eerst worden gecorrigeerd voor allerlei effecten welke in het instrument zelf ontstaan.

We noemen er enkele:
— De versterkingsfactoren van de verschillende kanalen, via welke de ontvangen signalen worden geregistreerd, zijn niet alle gelijk. Ze moeten van tijd tot tijd geijkt worden met behulp van puntbronnen, die op alle interferometers dezelfde zichtbaarheidsamplitude produceren. De verschillende versterkingsfactoren worden als correcties aangebracht.
— De fase van de signalen wordt beïnvloedt door kleine verschillen in kabellengte tussen de verschillende telescopen. Ook hier moet ijking regelmatig plaatsvinden.
— De vertragingslijnen (zie het artikel van Casse en Muller) produceren kleine veranderingen in fase en amplitude, afhankelijk van de op ieder moment ingeschakelde kabellengte. Eens per paar maanden worden deze verschillen ge-

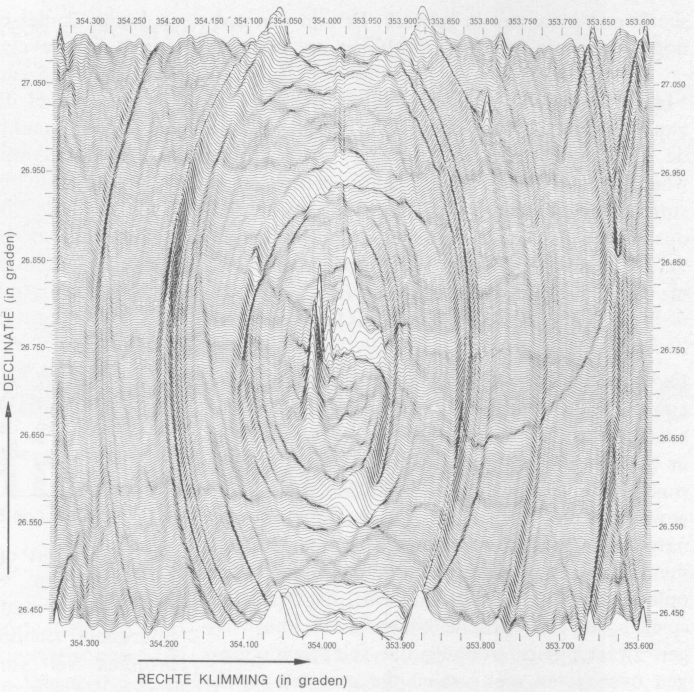



Fig. 7. Helderheidsverdeling van de radiobron 3C465 en zijn omgeving afgeleid uit een waarneming van twaalf uur met de Westerbork synthese radiotelescoop en automatisch getekend via de computer van de Rijksuniversiteit te Leiden. De figuur beslaat een stukje hemel van 0°.7 x 0°.7. Het verloop van de helderheid langs horizontale lijnen is grafisch weergegeven zodat een soort drie-dimensionaal beeld ontstaat. In de tekst wordt een toelichting gegeven op de ringvormige structuren welke niet alleen om de uitgestrekte bron in het midden van het veld, doch ook om de zwakke bron rechts-boven zichtbaar zijn.
De radiobron 3C465 bestaat uit verschillende componenten, die een gebied beslaan van ongeveer 650.000 lichtjaren doorsnede rondom een dubbel melkwegstelsel, dat optisch zichtbaar is en zich op een afstand van ongeveer 290 miljoen lichtjaren van ons bevindt.

meten, teneinde daaruit de aan te brengen correcties af te leiden.

— De basislijnen van de interferometers moeten zeer nauwkeurig bekend zijn, zowel wat lengte als wat oriëntatie betreft.
Tijdens de bouw is hieraan zeer grote zorg besteed. Zo zijn de twaalf telescopen onderling zeer nauwkeurig gelijk gemaakt (zie het artikel van Baars en Hooghoudt). Was dit namelijk niet het geval, dan zou de basislijn kunnen veranderen tijdens een meting als gevolg van de draaiïng van de telescopen. Ook is de opstelling op onderling gelijke afstanden langs een rechte oost-west lijn binnen enkele millimeters nauwkeurig geschied.

Hoewel deze nauwkeurigheid voldoende is voor het doen van de metingen, is het voor het reduceren ervan toch nodig de plaatsen van de telescopen ten opzichte van elkaar nog beter, namelijk op enkele tienden van millimeters, nauwkeurig te weten. Gelukkig kan dit met behulp van astronomische metingen. We hebben er de nauwkeurige posities aan de hemel van enkele puntbronnen voor nodig. Omdat vele bronnen geïdentificeerd zijn met optische objecten, beschikken we inderdaad over zulke nauwkeurige posities.

De lengten en oriëntaties van de basislijnen van de interferometers hebben we met behulp van metingen van die (calibratie-)bronnen kunnen afleiden. Gebleken is dat de constructeurs hun werk uitstekend hebben gedaan: alle telescopen staan binnen 3 à 4 mm op hun plaats. De calibratie van de basislijn moet iedere keer, als de verrijdbare telescopen verplaatst zijn, opnieuw gebeuren.
Uit het hierboven geschetste, en nog lang niet complete, lijstje blijkt dat op de half miljoen geregistreerde getallen heel wat bewerkingen moeten worden toegepast, alvorens we eraan toe zijn om een kaart van een stukje hemel te produceren. Niet alleen moeten de correcties worden toegepast, maar ook moeten ze uit de calibratiemetingen worden afgeleid. Het zal duidelijk zijn dat het gebruik van een zeer snelle elektronische computer geen luxe is.
Enkele functies van de centrale computer op de radiosterrenwacht zelf, die een essentieel onderdeel van het ontvangersysteem is, worden beschreven in het artikel van Casse en Muller.

## Enkele resultaten

Op het ogenblik dat dit artikel wordt geschreven (mei 1970) is de Westerbork synthese-tele-

scoop nog maar net in gebruik. Er zijn dan ook nog geen echt nieuwe resultaten te melden.

Figuur 7 geeft de gemeten helderheidsverdeling van een uitgestrekte bron 3C465 (nr. 465 uit de 3e Cambridge catalogus) na 1 x 12 uur waarnemen. De verrijdbare telescopen A en B stonden op respectievelijk 72 m en 144 m ten oosten van de laatste vaste telescoop (telescoop 9). De basislijnen waren dus respectievelijk 72 m (9-A), 144 m (9-B), 216 m (8-A), 288 m (8-B) . . . 1224 m (1-A), 1296 m (1-B), 1368 m (0-A) en 1440 m (0-B).

Een van de opvallendste verschijnselen in figuur 7 is het stelsel van ringen rondom de bron. De ringen komen voor rond iedere bron in het veld en daarom hebben ook de ringen rondom de uitgestrekte bron 3C465 een zo ingewikkeld karakter. De ringstructuur is een natuurlijk gevolg van het meten met een stel interferometers, waarvan de basislijn-lengtes oplopen met een vast interval. Als men de spiegel van een optische kijker bedekt met ringen zwart papier, zodanig dat spiegelende ringen overblijven met stralen die met een regelmatig interval oplopen (vergelijk figuur 3b), dan zal een foto van een aantal ver weg staande lichtbronnen, opgenomen met deze spiegel, niet alleen de lichtbronnen als puntjes te zien geven, maar rondom ieder puntje zal een serie ringen zichtbaar zijn.

De afmetingen van de ringstructuren in het beeld hangen af van het interval tussen de verschillende basislijn-lengtes. Hoe groter dat interval, des te dichter komen de ringen (roosterringen) bij elkaar; hoe kleiner het interval, des te verder gaan ze van elkaar. Willen we de ringen dus verder naar buiten hebben, dan moeten we niet, zoals hier gebeurd is, de basislijnen laten oplopen met 72 meter, maar met slechts 36 of 18 meter. De eerste stap, die een verdubbeling van de waarneemtijd betekent, (er moet immers nog een meting worden gedaan met telescoop A op 36 meter en telescoop B op 108 meter ten oosten van telescoop 9) brengt de ringen twee keer zo ver weg. Om de ringen vrijwel buiten het veld te brengen, zijn nog twee metingen nodig, zodanig dat door combinatie van alle vier metingen van twaalf uur het interval 18 meter wordt. Als het te bestuderen object niet groter is dan de straal van de roosterringen, zal echter in het algemeen de herhaling niet nodig zijn.

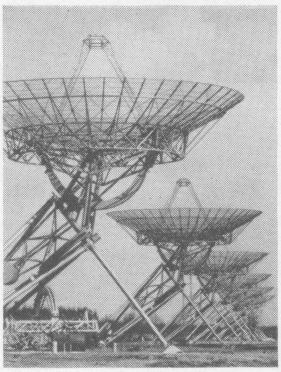
Het zal zijn opgevallen dat het ringenpatroon in figuur 7 niet cirkelvormig, doch elliptisch is. Dit is het gevolg van het feit dat de richting waarin 3C465 aan de hemel staat een hoek van 63 graden met de richting naar de noordelijke hemelpool maakt. Uit de bron gezien, ziet de Westerbork synthese-telescoop er dus uit zoals men in figuur 3 b ziet, wanneer men niet loodrecht op de bladzijde van het tijdschrift kijkt, maar onder een hoek van 27 graden. De intervallen in de oost-west richting (horizontaal in figuur 3b) blijven gelijk aan wat loodrecht wordt gezien, maar de intervallen in de noord-zuid richting (verticaal) worden verkort met een factor cos 63 = 0,45. Volgens de eerder gegeven redenering betekent dit, dat de straal van de ringen in het beeld in de N-Z richting wordt vergroot met een factor

$$\frac{1}{\cos 63} = \frac{1}{0{,}45} = 2{,}22.$$

Dit brengt ons op een nog niet eerder vermelde eigenschap van onze synthese-telescoop: Om dezelfde reden waarom de intervallen in de noord-zuid richting verkort worden gezien door bronnen ver van de noordelijke hemelpool, wordt ook de totale afmeting van de langste basislijn, met dezelfde factor verkort gezien. Dat wil zeggen dat het scheidend vermogen (de beeldscherpte) in de noord-zuid richting ook met deze factor achteruit gaat.
Voor bronnen op de hemelequator (90° van de pool) is de beeldscherpte in de oost-west richting nog steeds 25 boogseconden bij 20 cm golflengte, in de noord-zuid richting is de scherpte echter niets beter dan die van een enkelvoudige 25-m telescoop: 30 boogminuten.

Natuurlijk blijven aan het eind van dit artikel vele vragen over. Op enkele van die vragen wordt in de hierna volgende artikelen geantwoord. Eén ding zal duidelijk zijn: niet alleen bij de bouw, maar ook bij het werken met een groot instrument als de Westerbork synthese-telescoop, komt zeer veel kijken. Het is onmogelijk als er niet een nauw samenspel is tussen technici, astronomen en computerdeskundigen. Dit komt ook enigszins tot uiting in het lijstje van auteurs van deze artikelenreeks . . . Zij horen voornamelijk in de eerste twee categorieën thuis. De programma's voor de verwerking van de gegevens op de Leidse IBM computer vormen echter een zodanig belangrijk verlengstuk van de telescoop, dat het niet juist zou zijn de naam van de ontwerper van de programma's Drs. W. N. Brouw, astronoom bij de Leidse sterrenwacht, onvermeld te laten.

de Synthese Radiotelescoop te Westerbork



**J. W. M. Baars,**
Radiosterrenwacht Dwingeloo,
**B. G. Hooghoudt,**
Raadgevend ingenieur BTA - Oegstgeest

# de constructieve en geodetische aspecten

De eis dat alle afmetingen, vormen en afstanden over het gehele instrument binnen één millimeter nauwkeurig moesten zijn, heeft geleid tot speciale meettechnieken en constructiemethoden. De eerste resultaten van de waarnemingen te Westerbork bevestigen, dat bij de constructie inderdaad een zeer hoge nauwkeurigheid is bereikt.

Voorbijgaand aan het langdurige gedachtenspel dat nodig is geweest voor de bepaling van de hoofdafmetingen van de syntheseradiotelescoop, wordt men geconfronteerd met de constructieve samenhang van twaalf eenheden over een afstand van ruim 1½ kilometer. Iedere eenheid — een radiotelescoop met een reflector van 25 m doorsnede — eist op zichzelf een nauwkeurigheid van 1 mm in vormvastheid en bewegingsgang voor de reflector, het brandpunt en de draaiassen onderling, daarna volgt eenzelfde tolerantie voor de onderlinge verschillen in de diverse eenheden en tenslotte moet de onderlinge plaatsing en beweging t.o.v. elkaar over 1600 m eveneens geen grotere afwijking dan 1 mm vertonen.

Bij het ontwerp en de uitvoering van de telescopen, evenals bij de metingen en de plaatsing van iedere telescoop in Westerbork, is zeer veel aandacht besteed aan de nauwkeurigheid in alle facetten. In het ontwerp is hardnekkig gerekend aan de te verwachten deformaties van de onderdelen en in de detaillering is alle aandacht besteed aan stijve verbindingselementen, terwijl de toepassing van mallen de maatvastheid van de onderdelen in hoge mate heeft bepaald. Voor de juiste plaatsing zijn astronomische en geodetische meetmethoden met zorg gecombineerd.

De eerste resultaten van de waarnemingen te Westerbork bevestigen, dat er inderdaad een zeer hoge nauwkeurigheid is bereikt. Hiervan wordt in het voor de uitwerking van de waarnemingen benodigde gecompliceerde rekenprogramma dankbaar gebruik gemaakt en het kan aan alle betrokkenen voldoening schenken dat in dit opzicht in Westerbork een wezenlijke bijdrage aan de techniek is geleverd.

## De telescoop

De *reflector* bestaat uit een ringvormige ondersteuningsligger met uithouders (zie de constructietekeningen op de bijlage) waarop de reflectorpanelen — bespannen met roestvrij stalen gaas met 8 mm openingen — zijn bevestigd. Teneinde een splitsing van grof en fijn werk mogelijk te maken, werd de ringligger uit vier delen op een vloer samengelast, temidden van, doch ook geheel los van vaste steunbokken, die — na nauwkeurig ingemeten te zijn — de reflectorpanelen droegen.

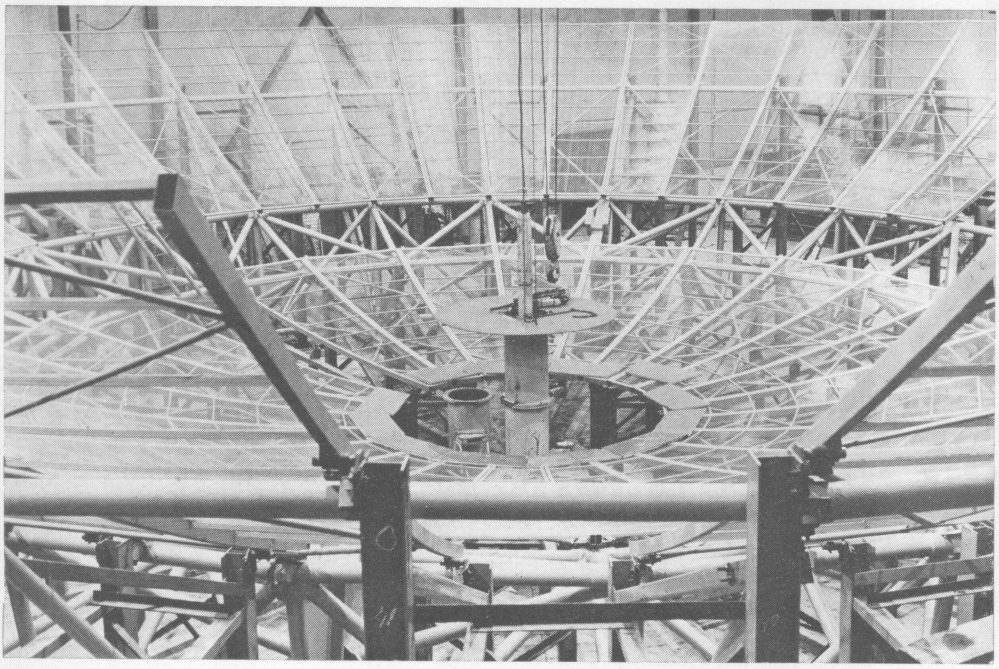


Fig. 1. Een gedeeltelijk gemonteerde spiegel in de assemblagemal. De ringligger is nog zichtbaar, het overige deel is reeds met gaaspanelen belegd. Uit de lichtreflecties blijkt de vormnauwkeurigheid van het gespannen gaas. Op de voorgrond enige „potje-pen"-verbindingen.

De verbindingen tussen de panelen enerzijds en de ringligger met uithouders anderzijds werden in de allerlaatste fase tot stand gebracht d.m.v. verlijmen. Dat betekende het vullen van potjes aan de ringliggerconstructie, waarin pennen van de panelen steken. De pennen hebben ca. 1 cm alzijdig ruimte in de potjes, zodat de staalconstructie volgens de gangbare praktijk met de normale toleranties kon worden samengesteld (fig. 1).

De werkvloer en steunbokken zijn ondergebracht in een grote hal, teneinde de klimatologische invloeden uit te schakelen — een temperatuurverschil van 10°C op een lengte van 10 m betekent een verlenging van 1 mm — en tevens om de voortgang van de assemblage te verzekeren.

Hier kwam gedurende een jaar iedere vier weken een reflector gereed, inclusief conservering. Via een hijsinrichting aan het dak werd deze op een wagen geplaatst en door een hangardeur naar buiten gereden naar de plaats van bestemming, om t.z.t. te worden opgehesen op de onderbouw.

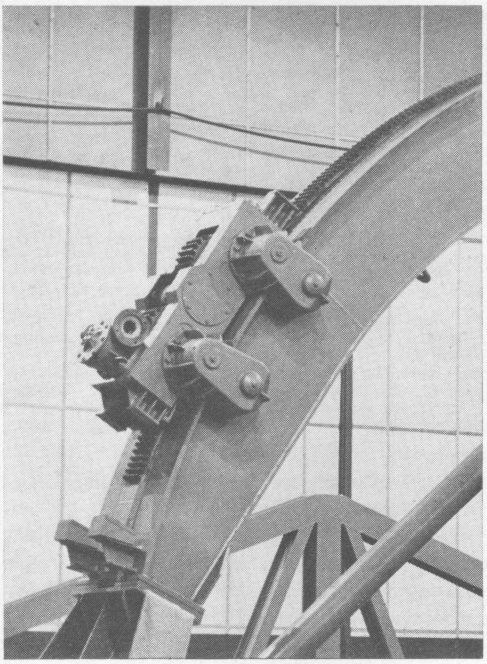
In de ringligger zijn vier steunpunten opgenomen, waarmede de reflector is bevestigd op een vierkant raam dat de declinatie-as en het declinatie-aandrijfkwadrant bevat. Op dezelfde steunpunten zijn de vier uithouders naar het brandpunt van de reflector bevestigd. Het vierkante raam draagt de reflector en heeft de naam *„wieg"* gekregen. In de declinatielagers wordt deze gedragen door het *poolashuis,* eveneens voorzien van een aandrijfkwadrant. Dit huis wordt op de poolaslagers gedragen door de *onderbouw,* een stelsel van nastelbare buizen naar de betonnen fundatie (fig. 9).
De *kwadranten* worden aangedreven door een rondselwagen met tandwielkast, die zeer precies t.o.v. de vertanding is ingesteld om de vereiste zeer nauwkeurige beweging te verkrijgen — binnen één honderdste graad (fig. 3).

Met uitzondering van de onderbouw zijn alle genoemde hoofddelen uit in de fabrieken bewerkte onderdelen in de bouwhal samengesteld. Het tempo moest uiteraard passen in het werkschema van vier weken per telescoop. Alle delen waren nauwkeurig genoeg om onderling te

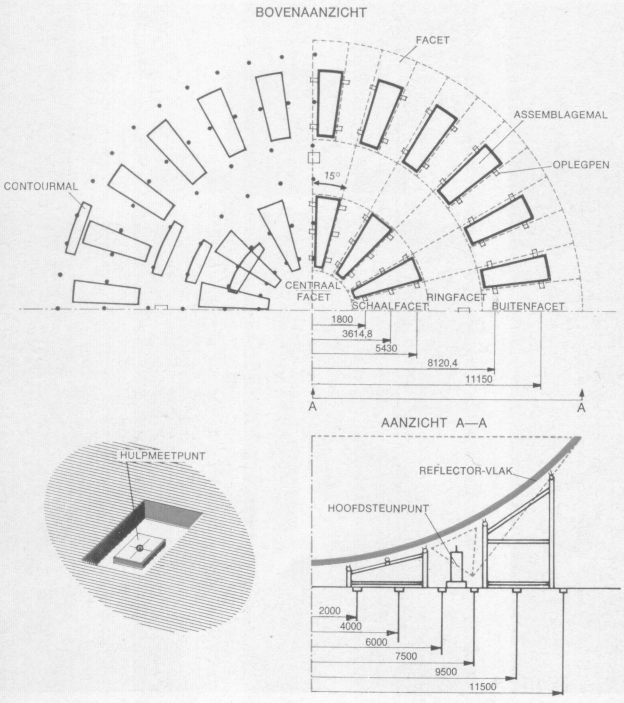
kunnen worden verwisseld. Van deze mogelijkheid is geregeld gebruik gemaakt bij onverwachte detailmoeilijkheden. De twee laatste telescopen konden daardoor in enkele dagen met de grote kraan in elkaar worden gezet, een zelfs voor Westerbork opvallende gebeurtenis (fig. 10).
De betonnen *fundaties* alsmede de onderheide betonbalk voor de railbaan, zijn geheel gedimensioneerd op stabiliteit. De sterk wisselende grondsamenstelling maakte het nodig op diverse plaatsen een verbetering van de grondslag uit te voeren.

**De metingen**

Bij de bouw en opstelling van de twaalf antennes is niet alleen gelet op een goede gelijkheid, maar is tevens een zeer hoge absolute nauwkeurigheid in de maatvoering nagestreefd.
Bij de assemblage van de telescopen is uitgebreid gebruik gemaakt van mallen. Alle mallen zijn ingesteld met een nauwkeurigheid van 10 pct van de toegestane fout in de geassembleerde delen.
Bij de samenbouw van het *poolashuis* is het belangrijkste aspect dat de onderlinge afstand en oriëntering van poolas en declinatie-as correct,



Boven: Fig. 3. Het declinatiekwadrant met de rondselwagen die door geleidewielen nauwkeurig t.o.v. de tandkrans wordt bewogen.
Onder: Fig. 2. Schematisch overzicht van de assemblagemal voor de reflector, de meetpunten op de vloer en de lokatie van de reflectorfacetten.




constant en reproduceerbaar zijn.

De eisen zijn:

a) de hoek tussen declinatie-as en poolas moet minder dan 15 boogseconden afwijken van 90 graden in beide richtingen.

b) de verschillen in afstand van declinatie-as tot poolas tussen de 12 telescopen onderling mogen niet meer dan $^1/_2$ mm bedragen.

De poolas en declinatie-as werden in de mal geplaatst en met elkaar verbonden door een viertal buizen. De oplegpunten in de mal voor de twee assen zijn met grote nauwkeurigheid gemeten en ingesteld. Daarbij is gebruik gemaakt van een waterpasinstrument, theodoliet, maatstok en richtkijker, waarmee afstanden en hoeken tot een nauwkeurigheid van respectievelijk 0,1 mm en 2 boogseconden kunnen worden bepaald.

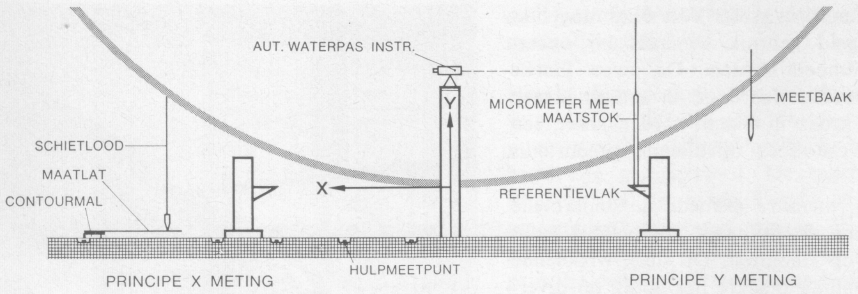
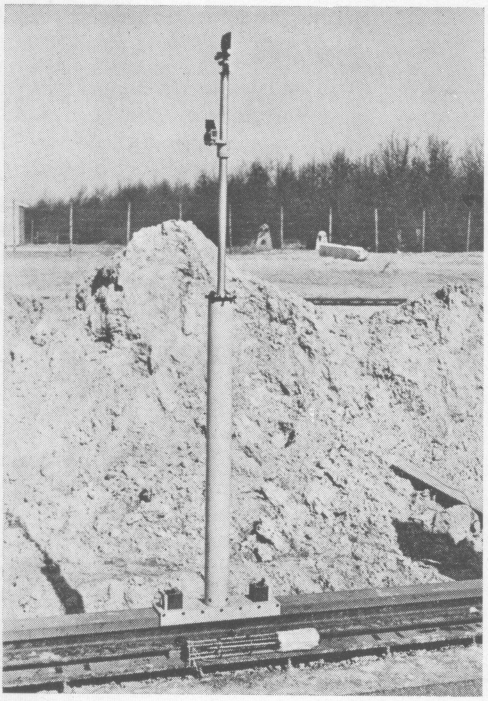
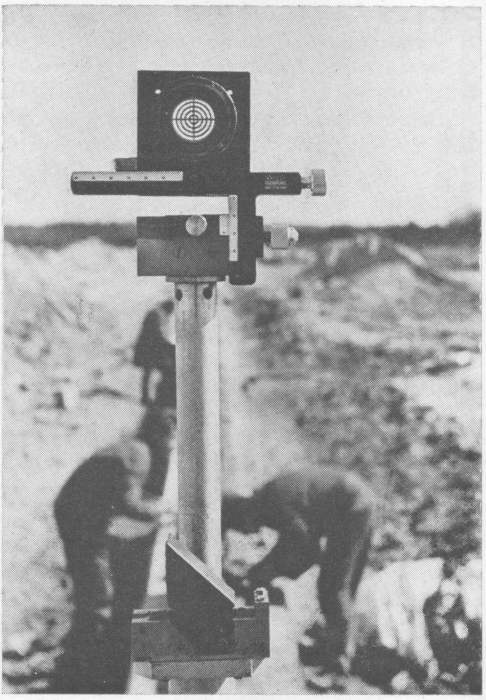



Fig. 4. Principe van de meting van x- en y-coördinaat in de reflectormal. De y-waarde van een meetbaak, die aan het reflectorgaas is gehangen, wordt met het waterpasinstrument vergeleken met de waarde op de maatstok, die op het referentievlak is geplaatst. Voor de x-waarde wordt een maatlat tegen de contourmal geplaatst, die op de bekende hulppunten in de vloer is geplaatst. De x-waarde wordt op de maatlat onder het schietlood, dat aan het reflectorgaas hangt, afgelezen.

Het grote probleem is de maatvoering in de hand te houden tijdens het lassen van de verbindingsbuizen. Door uitzetting en inkrimping tijdens het lasproces zit er ongeveer 3 mm „beweging" in het poolashuis. De gehele lasprocedure werd begeleid door een voortdurende meting. Hierdoor is het gelukt de verschillen tussen de 12 poolashuizen te beperken tot 0,3 mm in afstand en 5 boogseconden in de onderlinge loodrechtheid van de assen. De oorspronkelijke tolerantie-eisen zijn ruimschoots overtroffen.

Het *reflectorvlak*, bestaande uit 98 afzonderlijke gaaspanelen, is ook op een mal samengesteld. De mal bestaat uit 72 stalen spanten met oplegpennen, die op vijf concentrische cirkels zijn uitgezet (fig. 2), ter ondersteuning van de reflectorpanelen, en vier hoofdsteunpunten voor de ondersteuning van de reflectordraagconstructie (ringligger).





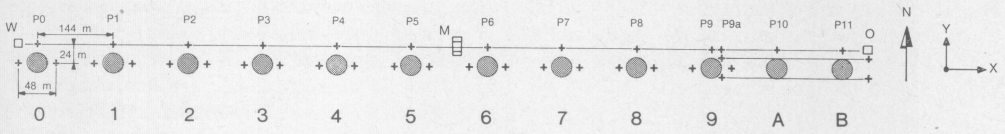



Fig. 7. Overzicht van de meetsituatie bij de 1,6 km lange basislijn. W-M-O is de hoofdlijn in oost-westrichting, waarop P0—P11 worden geplaatst. De plustekens geven de posities van meetpijlers aan voor het positioneren van de telescopen 0—9. Telescopen A en B rijden over de railbaan (rechts in de tekening), die ook nauwkeurig is vastgelegd.

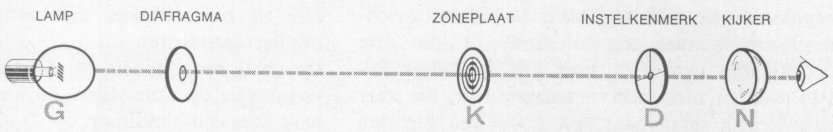
De hoofdsteunpunten komen precies overeen met de vier vlakken van de declinatieconstructie, waarop de reflector wordt bevestigd. De fabricagenauwkeurigheid van de reflectorpanelen stond een maximale afwijking van ± 2 mm t.o.v. de theoretische paraboloïde toe. De extra fout, die ontstaat bij het samenstellen van de reflector, werd mede bepaald door de nauwkeurigheid van de mal. De toegelaten afwijking in de gemonteerde reflector is op ± 3 mm gesteld.

De oplegpennen van de mal, waarop de reflectorpanelen rusten bij de assemblage, zijn zeer nauwkeurig gesteld. Het principe van de meting is geïllustreerd in fig. 4. De verticale coördinaat is gemeten met een waterpasinstrument t.o.v. een referentiestandaard. Het instrument beschrijft bij ronddraaien om een verticale as een horizontaal plat vlak met grote nauwkeurigheid. Op afstanden van de orde van 10 m kan men er hoogteverschillen van minder dan 0,1 mm mee constateren.

In horizontale richting is gebruik gemaakt van een groot aantal hulpmeetpunten, die met grote nauwkeurigheid t.o.v. het middelpunt van de mal op de vloer zijn bevestigd. Met behulp van een nauwkeurige maatlat en een schietlood is de horizontale coördinaat bepaald. Voor een aantal kritieke metingen is een speciaal „optisch lood" toegepast, dat de positie van een merkpunt op de pen loodrecht naar beneden op de maatlat aangeeft. De fouten in de horizontale coördinaat liggen tussen ± 0,2 — 0,5 mm, afhankelijk van de gebruikte methode en de afstand tot het middelpunt.

Het samenstellen van de reflector op de nauwkeurig gestelde mal zal nu in principe zonder moeilijkheden verlopen. Om zeker te zijn dat bij het aanbrengen van de boutverbindingen tussen de facetten onderling geen fouten geïntroduceerd zijn en ook om de kwaliteit van de gehele reflector te beoordelen, zijn de afwijkingen van het gaasoppervlak op 250-300 punten van de reflector gemeten. Vrijwel alle punten lagen ruimschoots binnen de tolerantiegrenzen van ± 3 mm.

De middelbare standaard(root mean square)-fout van alle punten is 1,5 mm. Bij een golflengte van 6 cm zullen de afwijkingen t.o.v. de gewenste paraboloïde slechts een verlies van 10 pct. in rendement veroorzaken. Bij een golflengte van 10 en 21 cm is de reflector ideaal te noemen.




Hierboven: Fig. 8. Principe van de uitlijningsmethode met een zoneplaat, toegepast bij de 300 m lange railbaan. Het buigingslicht van de zoneplaat bestaat uit concentrische lichte en donkere ringen en kan overal achter de zoneplaat met de kijker scherp worden waargenomen. De zoneplaat wordt zijdelings verschoven tot het beeld samenvalt met het instelkenmerk.

Geheel links: Fig. 5. Het 1,8 m hoge statief met zoneplaat op de railbaan. De voet past zeer nauwkeurig om de alzijdig geschaafde rail en wordt met magneten vastgezet.

Links: Fig. 6. Het bovendeel van het statief met zoneplaat. Duidelijk is de instelbare kruisslede zichtbaar, waarmee de zoneplaat in hoogte en zijwaarts te verplaatsen is tot het beeld samenvalt met het instelkenmerk. De afwijking van de railbaan is op de kruisslede af te lezen. Onderaan bevindt zich een nauwkeurig waterpas om de verticale stand van het statief te controleren.

De meting aan het reflectorvlak verliep volgens precies dezelfde procedure als bij de reflectormal. Een baken, aan het gaasoppervlak bevestigd, vormde een goed instelmerk.

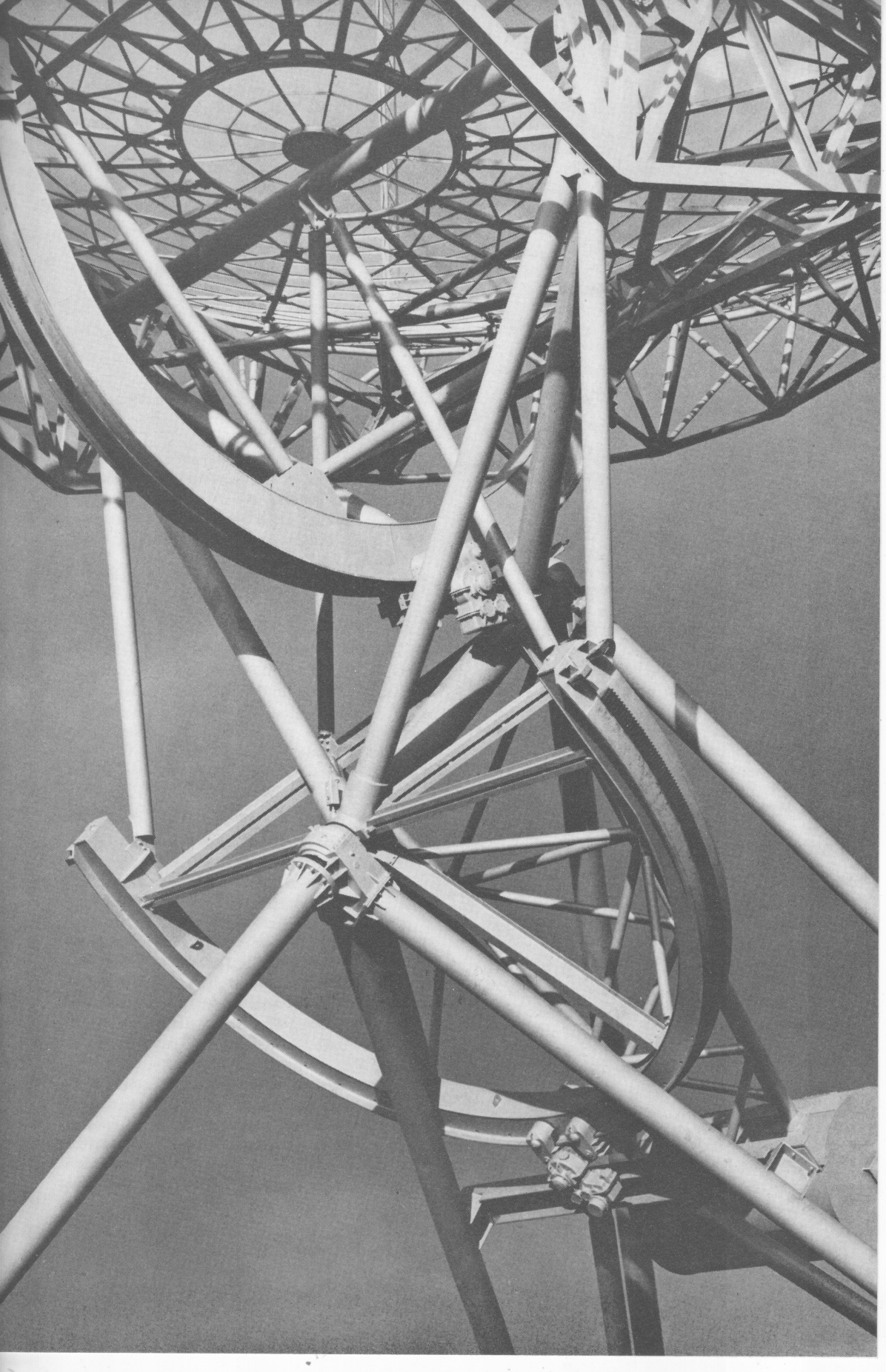
Voor een goede werking van de synthese-telescoop dienen de posities van de twaalf elementen t.o.v. elkaar zeer nauwkeurig bekend te zijn. Om praktische redenen is het gewenst de antennes op een rechte, horizontale lijn in oost-west richting te plaatsen en de afstanden tussen de tien vaste elementen precies gelijk te maken (zie de omslag). Dan voorkomt men steeds weer terugkerende correctieberekeningen, die veel computertijd vergen. Het streven in Westerbork is geweest om over de lengte van de telescoop (1600 m) een nauwkeurigheid in de plaats van de antennes te bereiken van ± 1 mm.
Als referentie werd een schaduwlijn vastgesteld door drie betonnen pijlers (west, midden en oost) op 24 m afstand van de lijn, waarop de telescopen zijn geplaatst.
Ter hoogte van iedere telescoop is een meetpaal (P) op de schaduwlijn geplaatst (fig. 7). Eerst werd de lijn W-M-O in oost-west richting gebracht m.b.v. waarnemingen van sterren met bekende posities.
Nu moeten we de posities van de meetpijlers P0-P11 t.o.v. de W-O lijn in y- en z-richting bepalen en de afstand tussen de pijlers (x-richting) meten, met een tolerantie in alle drie coördinaten van ± 1 mm. Op de pijlers P0-P11 werden meetmerken aangebracht, die zeer nauwkeurig verstelbaar zijn, zodat een gemeten afwijking daarmee kan worden verholpen.
De hoogtemeting (z-coördinaat) bestond uit een waterpassing. Het principe is gelijk aan de meting van de verticale coördinaat in de reflectormal. Met een waterpasinstrument werd de hoogte van een referentiepunt overgebracht naar het meetpunt.

De complicaties in dit geval zijn:
a) de nauwkeurigheid moet behouden blijven tot een afstand van 1600 m van het uitgangspunt. Daarbij wordt het instrument meermalen verplaatst. Bovendien kan de breking van het licht in de laag van de atmosfeer vlak boven de grond aanzienlijke straalafwijking veroorzaken;
b) om een rechte lijn te krijgen, die op een bepaald punt de aardbol raakt, moeten de metingen worden gecorrigeerd voor de kromming van het aardoppervlak.

De metingen werden slechts gedaan onder speciale weersomstandigheden, waarbij geen straalafbuiging optreedt. Dat is bij bewolkte hemel en winderig weer, met liefst een lichte regenval. De resultaten van twee onafhankelijke metingen, door twee verschillende groepen technici op verschillende tijden, vielen binnen 1 mm samen. De correcties voor de kromming van de aarde zijn eenvoudig te berekenen: ca. 5 cm op een afstand van 800 m.
Voor de afstandsmeting (x-coördinaat) werd gebruik gemaakt van meetdraden. Het materiaal is invarstaal, dat een zeer kleine temperatuurcoëfficient heeft. Zo'n draad is 24 m lang, zodat voor iedere afstand van 144 m tussen twee meetpijlers zes metingen nodig zijn. De draadlengtes zijn voor en na een meetserie geijkt. Herhaalde metingen met twee verschillende draden geven over de afstand van 144 m verschillen van 0,1 — 0,2 mm. Zelfs bij een ongunstige optelling van deze fouten over de totale lengte van 1600 m is een nauwkeurigheid van ± 1 mm te verwachten.
De positie van de meetmerken op P0-P11 t.o.v. de standaardlijn O-M-W (de y-coördinaat) werd bepaald door een nauwkeurige hoekmeting met een theodoliet vanaf de hoofdpijlers O, M en W en, ter verbetering van de nauwkeurigheid, ook van een aantal pijlers P. Het instrument staat een meetnauwkeurigheid van 0,1 — 0,2 boogseconde toe, wat op een afstand van 800 m overeenkomt met een afwijking van minder dan 1 mm.
De grote moeilijkheid bij deze meting is de invloed van de atmosfeer. Zo kan de aanwezigheid van een zandhoop op 1—2 m van de gezichtslijn een plaatselijke verandering in de brekingsindex van de lucht veroorzaken, die een straalbuiging van enige mm op een paar honderd meter ten gevolge heeft.

Ook bij deze metingen is uitsluitend onder genoemde speciale weersomstandigheden gewerkt. De invloed van toevallige fouten is verminderd door zeer veel metingen te doen. In totaal werden gedurende twee meetperioden ongeveer 4700 instellingen gedaan. De resulterende standaardfouten liggen tussen 0,05 en 0,4 mm, af-

Fig. 9. Rechts: Detailopname, waarop de reflector, het declinatiekwadrant, het poolashuis met aandrijving en de onderbouw goed zichtbaar zijn. De buis links-onder staat evenwijdig aan de aardas, evenals de in het verlengde hiervan liggende poolas. Door deze draaiïng om een scheefstaande as volgt de telescoop precies een hemelgebied.



hankelijk van de afstand tot pijler O. Er is dus goede reden aan te nemen dat alle pijlers binnen ± 1 mm op hun plaats staan.
De reflectorantennes moeten nu met eenzelfde nauwkeurigheid op een afstand van 24 m van de referentiepijlers P worden opgesteld. Daartoe zijn op de hartlijn van de rij telescopen bij iedere telescoop twee hulpmeetpijlers aangebracht. Omdat de afstanden nu kort zijn, is het behouden van de nauwkeurigheid geen groot probleem.
De telescoop zelf werd van dit drietal meetpunten af (P in de referentielijn en één ter weerszijden van de telescoop) in positie gebracht en ingemeten. Hierbij werd voornamelijk gebruik gemaakt van meetdraden en theodoliet.

Het spreekt vanzelf dat de 300 m lange railbaan voor de twee rijdende telescopen eenzelfde hoge nauwkeurigheid moet bezitten.
Eigenlijk wil men de nauwkeurigheid nog verhogen, omdat de rijdende telescopen op een willekeurige plaats neergezet moeten worden. Een fout in de positie van een vaste telescoop is nog wel voor eens en altijd te corrigeren, maar een variërende fout over een 300 m lange railbaan zal voortdurend veel tijd en moeite vragen in de correctieberekeningen.
De railbaan is in hoogte en in zijdelingse richting uitgelijnd m.b.v. een optische methode. Daarbij werd aan het ene einde van de baan een lichtbron opgesteld, aan het andere einde een loupe met instelkenmerk, terwijl op de rail een zoneplaat is geplaatst (fig. 8). Een zoneplaat bestaat uit een plaatje met concentrische, afwisselend lichtdoorlatende en ondoorzichtige, ringen. De zoneplaat vormt van het opvallende licht een buigingspatroon, bestaande uit lichte en donkere ringen, gecentreerd op de as van de lichtbundel. Het buigingspatroon is overal langs de as met een eenvoudig oculair scherp waar te nemen.
Bij de meting werd de zoneplaat, met een kruisslede verplaatsbaar in twee richtingen, op een statief op de rail geplaatst. De instelling van de kruisslede geeft de positiefout van de rail aan tot op 0,1 mm (fig. 5 en 6). Ook bij deze metingen is succes alleen mogelijk bij bewolkte hemel, wind en regen of motregen. Dan is een meetnauwkeurigheid over de 300 m lengte mogelijk van ± 0,15 mm.

Op slechts enkele punten is de afwijking van de rail meer dan 0,5 mm, overal minder dan 1 mm. Het overgrote deel van de rail ligt, zowel in hoogte- als zijdelingse richting binnen ± 0,3 mm op de gewenste rechte lijn.

De meetprocedures zijn arbeidsintensief en zeer tijdrovend geweest. Een voordeel is dat al dit werk werd gedaan in de constructiefase van het project, zodat men geen kostbare waarneemtijd in beslag nam. Bepalend voor het uiteindelijke nut is de mate waarin met het voltooide instrument, zonder veelvuldige en tijdrovende calibratiemetingen, nauwkeurige astronomische waarneemprogramma's kunnen worden uitgevoerd.

Bij de eerste waarnemingen met het voltooide instrument werden met goed resultaat de geometrische parameters ingevoerd, zoals zij uit de geodetische metingen volgen.
Latere, nauwkeurige metingen aan standaardradiobronnen hebben aangetoond, dat de oorspronkelijke tolerantie-eis van ± 1 mm vrijwel overal ruimschoots is gehaald. De tijd en moeite, die in deze metingen zijn gestoken, blijken goed te zijn besteed.

**De besturing**

Om de synthese van het waarneemgebied tot stand te brengen, dienen de twaalf telescopen gedurende twaalf uur synchroon met de tijd rond te draaien, uiteraard nadat alle declinaties op gelijke waarde zijn ingesteld. Hierbij eist men enerzijds een hoge richt- en bewegingsnauwkeurigheid, die constructief dient te worden gerealiseerd, anderzijds is vanwege de veelheid van aandrijfeenheden (24) een automatisering van de instelling gewenst.

De nauwkeurige bewegingen — de afwijkingen bedragen één honderdste graad — steunen op de toepassing van grote tandkransen, waarop met minimale speling een rondselwagen wordt geleid. Er zijn steeds twee rondsels toegepast die door een tandwielkast, met een snel lopende motor voor de instelling en een langzame synchroonmotor voor het volgen, kunnen worden aangedreven. Door een thyristorvoeding met frequentiesturing kan zowel met een vaste als een variabele snelheid worden gevolgd.

De positie van iedere telescoopas wordt gemeten door een impulsteller. Bij draaiïng worden van alle telescopen impulsen via kabels overgebracht naar een numerieke besturingsautomaat, die door telling vanaf een gedefinieerd nulpunt op ieder telescoop de positie van iedere draaiïngsas zeer nauwkeurig — tot

op een duizendste graad — bepaalt en aanwijst. Eigenlijk moet men zeggen: vergelijkt met de door de computer gewenste waarde en een alarm geeft bij afwijkingen. Op de computer kan men dan nog enige posities naar willekeur ter controle uitlezen. Uiteraard is de automatisering zover doorgevoerd dat de computer ook de instelling van de telescoop commandeert en daarna het volgen start. Bovendien blijft evenwel handinstelling steeds mogelijk.

Alle bedieningen en commando's geschieden steeds op afstand, zodat diverse beveiligings-

**De uitvoering**

Zowel in het ontwerp als in de uitvoering en de metingen hebben velen een belangrijk aandeel gehad. Het gedetailleerde ontwerp is gemaakt door N.V. Dwars, Heederik en Verhey, de fabricage, constructie en metingen zijn uitgevoerd door Bronswerk-Fijenoord, de bouw en betonwerken door de fa. Klootsema, terwijl de metingen werden aangevuld door Bureau van Steenis, Rijkswaterstaat, de Technisch Fysische Dienst TH-TNO, het Laboratorium voor Geodesie en de Sterrewacht te Leiden.

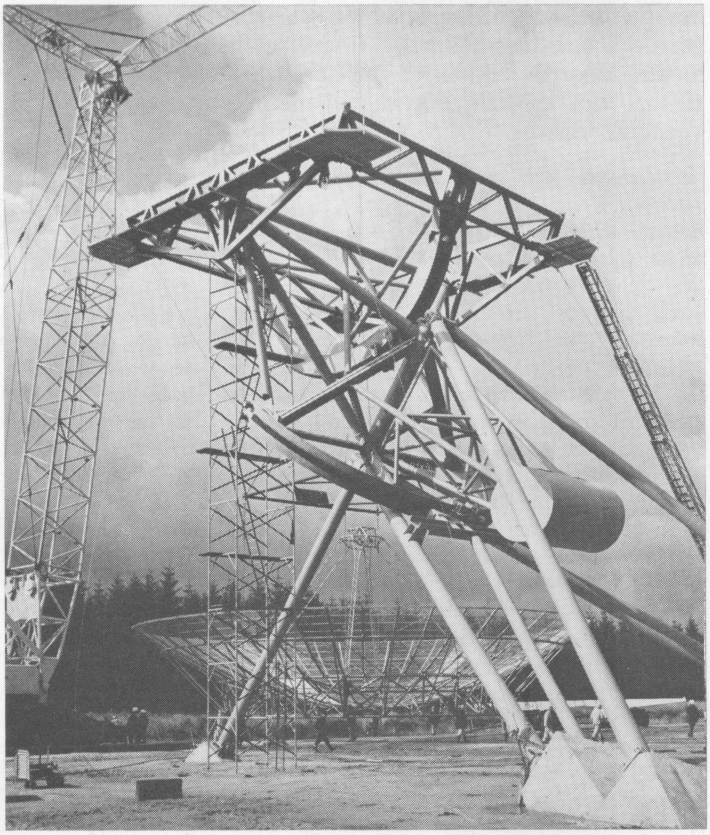


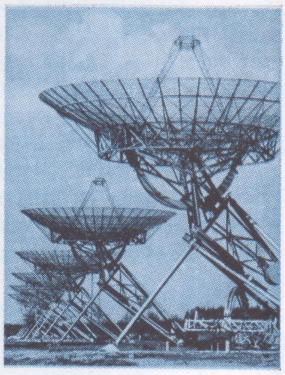
Fig. 10. De montagekraan draagt de complete reflector om deze bovenop de reeds gemonteerde wieg en poolashuis te plaatsen.

circuits en voorzieningen om onderlinge beïnvloeding te voorkomen, werden ingebouwd. De bediening van de wagens van de rijdende telescopen is geheel plaatselijk gehouden, doch de telescopen zelf worden over de gehele baan weer op afstand bediend.

De besturing werd ontworpen met en geleverd door Rademakers (mechanisch), Heemaf (elektrisch), de fa. Weseman (thyristorfrequentiesturing) en Philips (numerieke besturing, computer en bediening). Deze opsomming is zeker niet volledig te noemen.

**C. A. Muller**
Laboratorium van de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg, Dwingeloo

**J. L. Casse**
Laboratorium van de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg, Leiden.



## de Synthese Radiotelescoop te Westerbork

Essentieel voor de synthese-telescoop is het faseverschil tussen de signalen, ontvangen door de verschillende afzonderlijke telescopen. Dit leidt tot het gebruik van gecompliceerde schakelingen om de faseverschillen nauwkeurig te meten. Voor de ontvangst van het zwakke binnenkomende signaal zijn speciale ontvangers met parametrische voorversterkers nodig.

# het ontvangersysteem

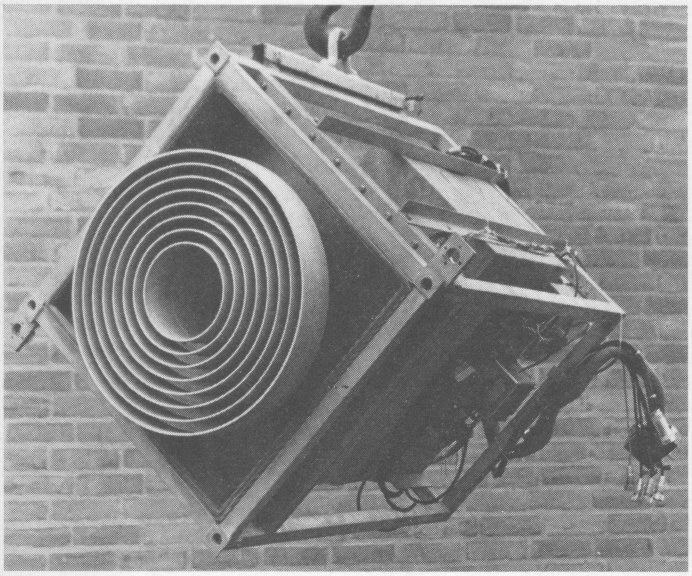
### Inleiding

De synthese-telescoop te Westerbork bestaat, zoals in het artikel van dr. E. Raimond is uiteengezet, uit een systeem van twintig langs een oost-west lijn opgestelde interferometers. Iedere interferometer maakt hierbij gebruik van één van de tien vast opgestelde en één van de beide verplaatsbare telescopen. Om alle informatie te verkrijgen voor een twee-dimensionaal beeld van het veld van waarneming of een deel ervan, wordt de draaiïng van de aarde gebruikt om de verbindingslijn van de telescopen alle benodigde oriëntaties ten opzichte van dit veld te geven. Dit betekent dat telescopen en ontvangersysteem het veld van waarneming over een tijdsinterval van twaalf uur moeten kunnen waarnemen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een besturingscomputer, die het gehele waarneemproces, met inbegrip van de positionering van de telescopen, regelt en bewaakt en verder de meetgegevens samen met een aantal instrumentele gegevens op magnetische band vastlegt. De verwerking van al deze gegevens vindt niet te Westerbork plaats maar centraal op het rekencentrum van de Rijksuniversiteit in Leiden. Het ontvangersysteem van de synthese-telescoop bestaat dus in beginsel uit twintig parallel werkende interferometerontvangers. Iedere telescoop heeft hierbij zijn eigen versterkergedeelte, gedeeltelijk nabij het brandpunt van de reflector opgesteld (de voorversterker) en gedeeltelijk in het centrale ontvangergebouw. De uitgangssignalen van dit versterkergedeelte worden verdeeld over twintig zg. correlatorsystemen, die het gemeenschappelijk gedeelte van de interferometers vormen.

Elke interferometer is hierbij een viervoudig systeem, om met de synthese-telescoop niet alleen de verdeling van de totale stralingsintensiteit over het veld van waarneming, maar ook de polarisatietoestand van de straling te kunnen meten. In verschillende gevallen is de straling van de waar te nemen objecten gedeeltelijk lineair, circulair of elliptisch gepolariseerd, wat belangrijke aanwijzingen over de fysische processen, die de straling veroorzaken, inhoudt.

Gewoonlijk wordt de volledige polarisatietoestand beschreven door de vier zg. *Stokes*-parameters: I, Q, U en V. I geeft de totale stralingsintensiteit en de drie andere beschrijven de polarisatie-eigenschappen van de straling. Voor het meten van deze vier parameters wordt in het brandpunt van elke telescoop gebruik gemaakt van een antennesysteem dat de beide lineair-gepolariseerde componenten, waarin de totale

straling steeds kan worden ontbonden, afzonderlijk ontvangt. Deze worden met twee geheel gescheiden ontvangerkanalen versterkt, zodat elke telescoop twee uitgangssignalen heeft.
Sluit men nu zg. correlatorkanalen aan tussen alle combinaties van de uitgangen van de beide telescopen, dan worden vier grootheden gemeten, waaruit de gewenste *Stokes*-parameters kunnen worden afgeleid. In de praktijk is het meten van de volledige polarisatietoestand niet eenvoudig, vanwege de instrumentele correcties, die nodig zijn bij het meten van zwakke polarisatiegraden.



De voorversterkereenheid, met aan de voorzijde de cylindrische ontvangantenne.

**De interferometer**

Neemt men met een enkelvoudige radiotelescoop een puntbron (een als puntvormig te beschouwen bron van radiostraling) waar, door bijvoorbeeld met een stilstaande telescoop met behulp van de draaiïng van de aarde, de bron de asrichting van het instrument te laten passeren, dan wordt in de registratie de bron sterk verbreed afgebeeld (zie fig. 1a).
De schijnbare breedte, ook wel halfwaardebreedte genoemd, wordt in eerste benadering geheel bepaald door de diameter van de parabolische reflector en de golflengte van de waargenomen straling, waarbij de halfwaardebreedte omgekeerd evenredig is met de diameter in golflengtes. Omdat in de radiosterrenkunde de golflengte zoveel groter is dan die in de optische sterrenkunde, is bij een radiotelescoop de diameter in golflengtes vrij klein. Daardoor is het beeld van een puntbron, verkregen met een radiotelescoop, veel groter dan het beeld van een ster in de optische sterrenkunde, waardoor in het radiobeeld van een veld aan de hemel eigenlijk steeds de fijne details ontbreken, die op een sterrefoto zichtbaar zijn.

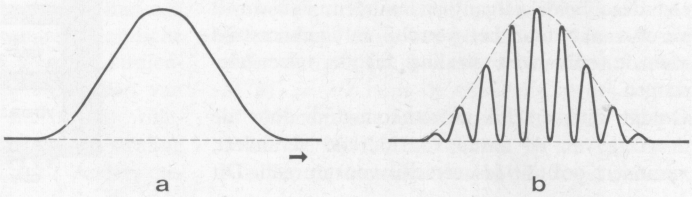
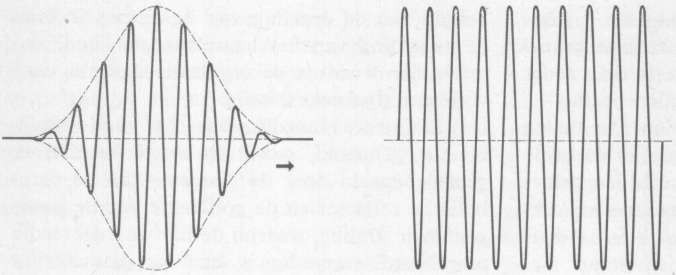



Fig. 1a. Afbeelding van een puntbron met een enkele (stilstaande) telescoop. Het beeld bestaat uit één brede lus.
b. Idem, met een interferometer met een eenvoudige (som-) ontvanger. Het beeld bestaat uit een aantal smalle lussen of franjes.



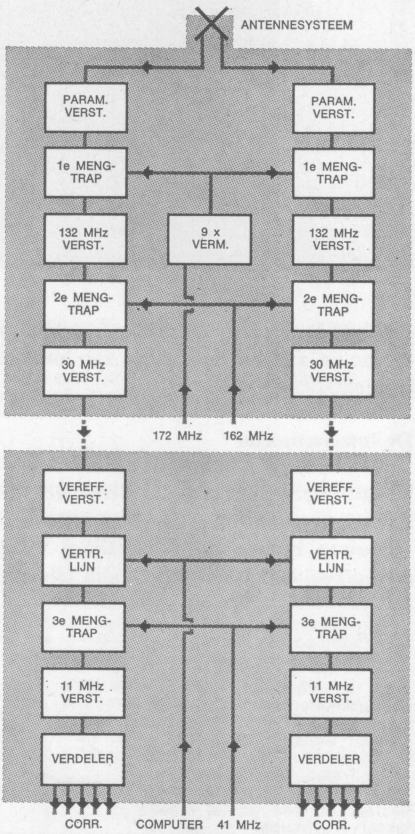
c d

Fig. 1c. Als 1a, echter met een interferometer met een correlatie-ontvanger. Het franjepatroon oscilleert om de nulwaarde. d. Als c, maar met telescopen, die de puntbron volgen. Het franjepatroon heeft een constante amplitude.

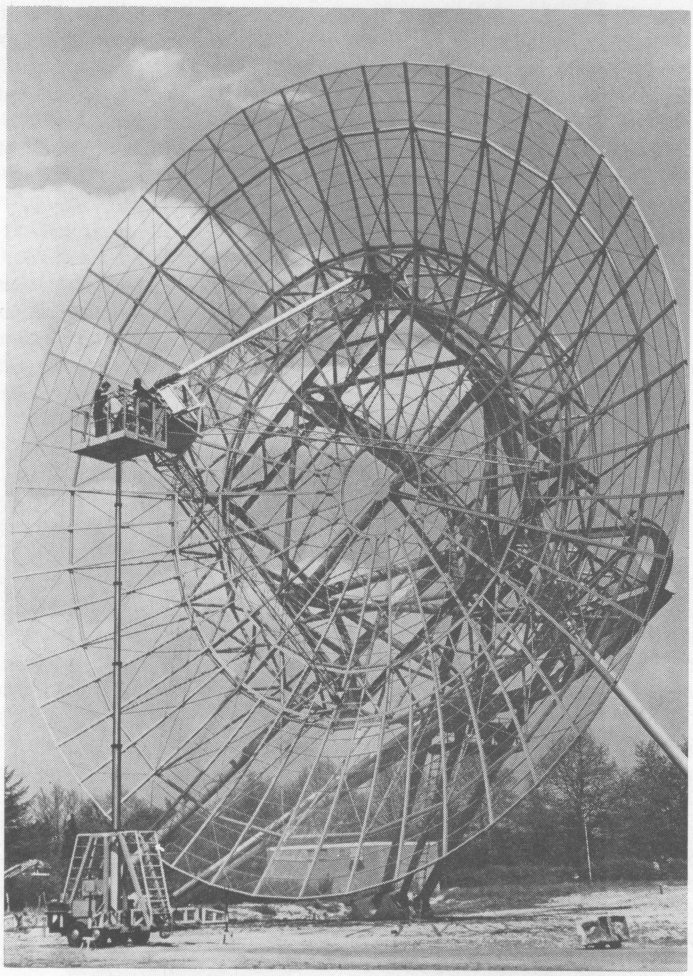
Al vroeg is men daarom in de radiosterrenkunde gaan zoeken naar mogelijkheden voor veel grotere instrumenten of equivalenten daarvan. De interferometer is hierbij naast de enkele radiotelescoop eigenlijk het tweede basisinstrument in de radiosterrenkunde geworden.

In zijn eenvoudigste en oudste vorm bestaat een interferometer uit twee afzonderlijke telescopen op kleinere of grotere afstand uit elkaar, die via kabels, die we eenvoudigheidshalve voorlopig van gelijke lengte zullen aannemen, op de ingang van één ontvanger zijn aangesloten. Hierbij is gewoonlijk in elke telescoop een voorversterkergedeelte aanwezig, omdat de verliezen bij het transport over een kabel vrij belangrijk zijn, vooral wanneer de afstanden tussen de beide telescopen en de centrale ontvanger groot worden.
Na optelling van de beide uitgangsspanningen van de kabels volgt verdere versterking, gevolgd door een detector, die een uitgangsspanning heeft die een maat is voor het totale uitgangsvermogen van de versterker, gemiddeld over een zeker tijdsinterval. Het uitgangssignaal van de detector wordt gewoonlijk met behulp van een registrerend instrument vastgelegd op papier, ponsband of magnetische band.

Aan de ingang van de gemeenschappelijke versterker worden dus de uitgangsspanningen van de voorversterkers bij elkaar opgeteld, waarbij de twee bijdragen van het golffront van een puntbron, die door de beide telescopen zijn ontvangen, langs verschillende wegen de ingang bereiken. Hierbij treedt een faseverschil op tussen deze beide uitgangsspanningen, dat wordt veroorzaakt door het verschil in aankomsttijd van de ontvangen straling bij de twee telescopen.
Omdat dit verschil in aankomsttijd door de draaiïng van de aarde voortdurend verandert, verandert ook dit faseverschil voortdurend. Dit leidt tot een somspanning, die als functie van de tijd varieert tussen tweemaal de amplitude van één van de uitgangsspanningen en de amplitude nul (als de beide spanningen precies tegen elkaar in werken). In de uitgangsspanning achter de detector treedt dus, als functie van de tijd, een sinusvormig interferentiepatroon op, dat het franjepatroon wordt genoemd.
Nemen we op dezelfde manier als zo straks, met stilstaande telescopen van de interfero-



Het inbrengen, met behulp van een hefplateau, van een voorversterkereenheid in de doos achter het brandpunt van de reflector.



Links:
Fig. 2. Vereenvoudigd schema van het bij elke telescoop behorende versterkergedeelte. Dit bestaat uit een deel, dat nabij het brandpunt is ondergebracht (het bovenste deel) en een deel, dat in het bedieningsgebouw is ondergebracht (het onderste deel). Bij de beide verplaatsbare telescopen is het gedeelte beneden de vertragingslijnen dubbel uitgevoerd met verschillende 41 MHz oscillatorsignalen, die onderling 90° in fase verschillen.

meter, een puntbron waar, dan zien we dat het beeld van de puntbron nu in een aantal lussen van dezelfde breedte wordt opgedeeld, met als omhullende het beeld, zoals dat door een enkele telescoop wordt gevormd (zie fig. 1b). De breedte van de lussen wordt bepaald door de afstand van de beide telescopen, uitgedrukt in golflengtes van de waargenomen straling, terwijl bij de enkele telescoop de breedte van de dan optredende enkele hoofdlus wordt bepaald door de diameter van de telescoop in golflengtes.

Uit een nadere analyse volgt, dat men dit beeld nog kan beschouwen als de som van (a) de afbeeldingen van de beide telescopen afzonderlijk, die dus elk uit een enkele brede lus bestaan en (b) een sinusvormig interferentiebeeld, dat zowel positieve als negatieve waarden kan aannemen.

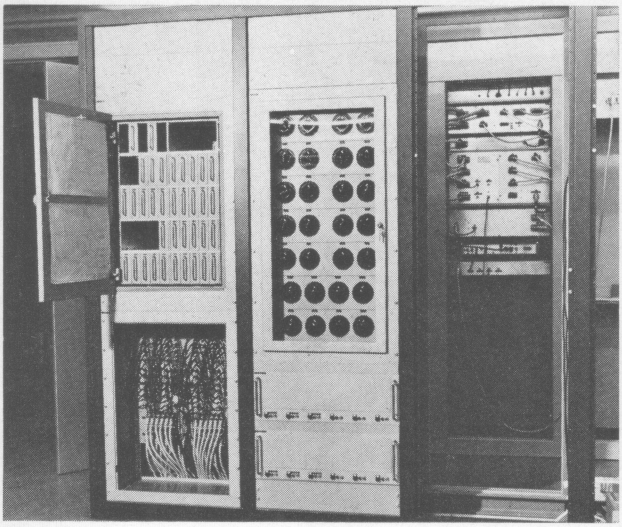
Omdat dit interferentiebeeld de eigenlijke nieuwe informatie vormt, wanneer men de interferometer vergelijkt met de enkele telescoop, wordt veelal met een interferometer-ontvanger alleen deze grootheid gemeten. Bij de interferometers van de synthese-telescoop wordt hiertoe een tweede gemeenschappelijk versterkerkanaal met detector gebruikt, aan de ingang waarvan de beide ingangssignalen worden afgetrokken in plaats van opgeteld.

Voor de beeldbijdrage van twee telescopen afzonderlijk is het onderlinge faseverschil van beide uitgangsspanningen niet van belang, zodat deze bijdragen niet veranderen. De inter-

ferentiebijdrage daarentegen wordt nu in fase omgekeerd, zodat door registratie van het verschil van de beide detectorspanningen de bijdragen van de telescopen afzonderlijk wegvallen en alleen het eigenlijke interferentiebeeld overblijft in de registratie als een sinusvormig franjepatroon, waarbij de uitgangsspanningen zowel positieve als negatieve waarden aannemen (zie fig. 1c).
Neemt men nu met een interferometer, met een dergelijke correlatorontvanger (zo genoemd, omdat de uitgangsgrootheid evenredig is met de kruiscorrelatie van de beide versterkte antennespanningen) een puntbron waar, terwijl de telescopen de bron volgen die zich in het midden van het veld van waarneming bevindt, dan treedt dus een franjepatroon op met een constante amplitude (zie fig. 1d). Bevindt de puntbron zich niet in het midden van het veld, maar op een andere plaats in het veld, dan treedt ook een dergelijk franjepatroon op, waarbij echter de fase van dit patroon veelal zal verschillen, omdat door de wat afwijkende richting van de puntbron het verschil in aankomsttijd wat anders zal zijn.

Ook wanneer niet een puntbron, maar een uitgebreider object met een willekeurige helderheidsverdeling wordt waargenomen, treedt een dergelijk sinusvormig franjepatroon op, dat dan te beschouwen is als de resultante van alle als puntvormig op te vatten kleine gebiedjes, waaruit men het object opgebouwd kan denken. Deze verschillende bijdragen tot het resulterende franjepatroon zullen niet alle dezelfde fase hebben, omdat het weglengteverschil afhangt van de richting waarin het gebiedje zich bevindt.
Hierdoor zal de amplitude gewoonlijk kleiner worden dan voor een puntbron met dezelfde totale stralingsintensiteit, terwijl ook de fase van het sinusvormige patroon veelal zal afwijken van de fase van het franjepatroon van een puntbron, die zich op de plaats van het object zou bevinden. Het zijn deze afwijkingen in amplitude en fase van het franjepatroon ten opzichte van een (werkelijke of fictieve) referentiepuntbron die de informatie geven, waaruit gegevens over de helderheidsverdeling in het veld van waarneming kunnen worden afgeleid.

Bij de interferometers van de synthese-telescoop wordt dit waargenomen franjepatroon direct tijdens de waarneming vergeleken met het berekende franjepatroon voor een puntbron in het midden van het veld van waarneming, en wordt als uitgangsgrootheid niet het franjepatroon zelf, maar alleen de amplitude en het faseverschil ten opzichte van het berekende franjepatroon geregistreerd. De berekening van

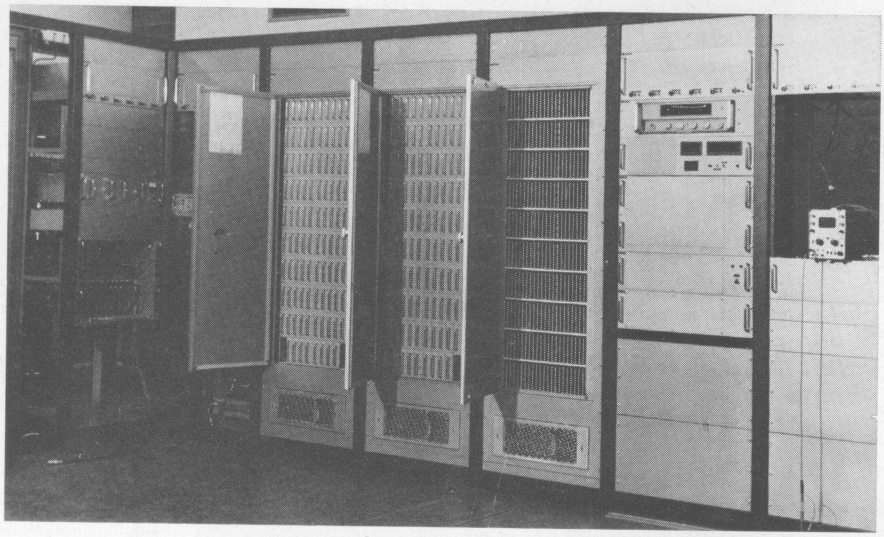


Links: Telescoopversterkers in het bedieningsgebouw. Linksonder het verdeelpaneel naar de vertragingslijnen. Rechts de regelbare verzwakkers, waarmee de uitgangsniveaus van de versterkers vóór verdeling naar de correlatorkanalen kunnen worden ingesteld.

Rechts: Een gedeelte van de centrale ontvangerruimte. Geheel links de centrale oscillatoren, met eronder het verdeelpaneel naar de 12 telescopen. In het midden twee kasten met elk 80 correlatorkanalen met ernaast rechts de kast die het laagfrequent gedeelte van de correlatorkanalen en de meetschakeling voor de meting van de zichtbaarheid bevat. Rechtsboven de digitale voltmeter met eronder de reed-relaisscanner.

dit franjepatroon geschiedt tijdens de waarneming door de besturingscomputer.

Ook amplitude en faseverschil veranderen gewoonlijk met de tijd door de verandering van de oriëntatie van de interferometer ten opzichte van het waarnemingsveld door de draaiïng van de aarde, maar deze veranderingen blijken veel langzamer te verlopen dan het franjepatroon zelf, waardoor de meetsnelheid ongeveer honderd maal langzamer kan zijn dan bij registratie van het volledige franjepatroon, namelijk één meting per 10 seconden.
Dit komt, omdat het veld van waarneming vrij klein is (in Westerbork ongeveer 0,5 graden, dus



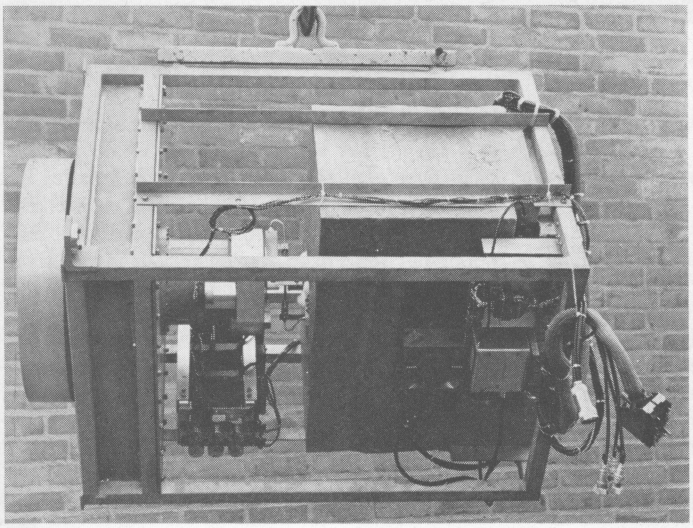
ongeveer even groot in hoekmaat als de zon of de maan), zodat het verschil in aankomsttijd voor een puntbron aan de rand van het veld ten opzichte van dat voor een bron in het midden van het veld vrij klein is, en dus ook met de tijd maar weinig en vrij langzaam kan veranderen.
De op deze wijze gemeten uitgangsgrootheden beschrijft men gewoonlijk als een complexe grootheid, die wel de complexe zichtbaarheid wordt genoemd. Een complexe grootheid kan worden beschreven door amplitude en fase, maar ook door een reëel en een imaginair deel.
Bij de in de ontvangers van de synthese-telescoop toegepaste meetmethode van de zichtbaarheid worden deze beide laatste grootheden gemeten. Uit de verdeling van de zichtbaarheid, als functie van de afstand tussen de beide telescopen en de oriëntatie van de verbindingslijn tussen de telescopen, wordt bij de synthese-telescoop (met behulp van een twee-dimensionale fouriertransformatie) de helderheidsverdeling over het veld van waarneming afgeleid.
Bij vele interferometers zijn de telescopen langs een oost-westlijn opgesteld, ook de twaalf telescopen van de synthese-telescoop. Tijdens de waarneming worden de telescopen op het veld van waarneming gericht gehouden, waardoor echter in het algemeen het verschil in aankomsttijd bij de telescopen van de van het veld afkomstige straling betrekkelijk groot kan zijn. Zo zal als het veld zich bijvoorbeeld vrij laag aan de oostelijke hemel bevindt, de straling de meest oostelijke telescoop het eerste bereiken. Het verschil in aankomsttijd wordt bepaald door het verschil in weglengte, dat in dit geval ongeveer gelijk is aan de onderlinge afstand van de twee telescopen van een interferometer.
Zoals we al eerder zagen verandert dit tijdverschil voortdurend ten gevolge van de draaiing van de aarde; het wordt nul bij de meridiaandoorgang in het zuiden en is maximaal als het veld in het oosten of westen staat. Het blijkt nodig, ter compensatie van deze vrij grote tijdsverschillen, in het ontvangersysteem van een

interferometer een instelbaar vertragingslijnsysteem op te nemen, dat ervoor zorgt, dat de door de beide telescopen ontvangen signalen na versterking en het doorlopen van het vertragingslijnsysteem toch vrijwel gelijktijdig de ingangen van de correlatorkanalen bereiken.

**De voorversterker („front-end")**

De al eerder genoemde voorversterker, die in elke telescoop in de directe omgeving van het brandpunt in een doos is geplaatst, is met de eigenlijke ontvangantenne samengebouwd. Het antennesysteem, dat gebruik maakt van een door een groep van de T.H. te Eindhoven ontwikkelde cylindrische antenne met gunstige stralingseigenschappen, maakt het mogelijk de beide lineair gepolariseerde stralingscomponenten, nodig voor het verkrijgen van volledige polarisatie-informatie, gescheiden te versterken, waarbij gebruik wordt gemaakt van een systeem van twee onderling loodrechte dipolen in de golfpijp die op de antenne is aangesloten.
Het dipoolsysteem is bovendien draaibaar uitgevoerd terwille van het meten van de polarisatie die wordt veroorzaakt door de telescopen zelf.
De voorversterker (zie fig. 2) maakt gebruik van een in eigen beheer ontwikkelde parametrische versterker met een versterking van circa 20 db, een versterkertype, waarbij de versterkerruis, die een ongewenst bijprodukt van het versterkingsproces vormt, aanmerkelijk lager is dan bijvoorbeeld bij transistorversterkers het geval is. Deze eigen ruis van de ontvanger, die geheel hetzelfde karakter heeft als de als straling door de antenne ontvangen hemelruis, maar die vaak aanzienlijk groter is, beperkt door zijn fluctuerend karakter de meetgevoeligheid van onze ontvangers, zodat het gewenst is deze eigen ruis laag te houden.
Hoewel het mogelijk is door koeling tot vloeibaar stikstof- of heliumtemperaturen deze ruis nog aanzienlijk te verminderen, wordt hier ter wille van de eenvoud de versterker met behulp van een thermostaat op een temperatuur nabij kamertemperatuur gehouden. De systeemruistemperatuur bedraagt ongeveer 230°K.

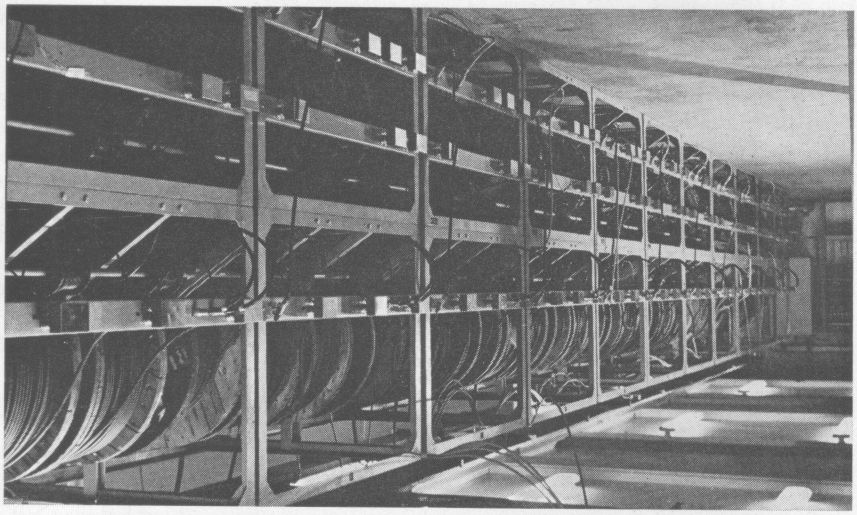
Achter deze op de signaalfrequentie werkende versterker volgt menging naar een middenfrequentie van 132 MHz. Het hierbij benodigde oscillatorsignaal op een frequentie van 1547 MHz wordt met behulp van een in elk frontend aangebrachte frequentievermenigvuldiger afgeleid van een centrale oscillator op een frequentie van 172 MHz, op welke frequentie dit signaal wordt gedistribueerd naar alle telescopen met in de grond begraven coaxiale kabels van gelijke lengtes.
Na verdere versterking volgt nogmaals menging, nu met een eveneens van een centrale oscillator afgeleide oscillatorfrequentie van 162 MHz, waarna op de uitgangsfrequentie van 30 MHz transport van de uitgangsspanningen naar het centrale bedieningsgebouw plaatsvindt.



Rechts: Een deel van de vertragingslijnsystemen in de kelder van het bedieningsgebouw.

Links: Zijaanzicht van de voorversterkereenheid. Rechts is de in schuimplastic gegoten thermostaatdoos zichtbaar, met één van de peltier-koelelementen (met ventilator). Het doosje rechts bevat de starteenheid voor de standaardruisbron. Linksmidden de cylindrische golfpijp met de door een stapmotor aangedreven antennerotator en de verbindingskabeltjes naar de ontvanger. Linksonder de voeding voor de peltier-koelers.

Daarvoor worden eveneens coaxiale kabels gebruikt.
Omdat het antennesysteem twee gescheiden uitgangen heeft, is de voorversterker dubbel uitgevoerd. Beide voorversterkers zijn samen in één thermostaat geplaatst, samen met verschillende stabilisatie- en regelschakelingen. Deze thermostaat werkt op een vaste temperatuur nabij 23 °C, zodat bij hogere omgevingstemperaturen koeling nodig is. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van peltier-koelelementen. De voeding van het front-end vindt plaats vanuit een gebouwtje (bij de verplaatsbare telescopen vanuit een kast op de wagen) aan de voet van de telescopen.



**Het vertragingslijnsysteem**

We zagen reeds, dat bij een interferometer de optredende grote verschillen in aankomsttijd worden gecompenseerd door toepassing van een vertragingslijnsysteem. Hierbij wordt het signaal van één van de voorversterkers door een kabel van zodanige lengte gestuurd, dat de looptijd in de kabel ongeveer gelijk is aan het verschil in aankomsttijd bij waarneming van een bron in het midden van het veld van waarneming. Uit een nadere analyse volgt, dat de nauwkeurigheid in tijd of weglengte, waarmee deze compensatie moet worden uitgevoerd, afhangt van de bandbreedte van de ontvanger, d.w.z. van de breedte van het deel van het spectrum, dat door de ontvanger wordt doorgelaten. Bij de synthese-telescoop is de ontvangerbandbreedte 4 MHz, en de maximaal toegelaten afwijking in weglengte 10 meter.

Ter vermindering van het totale aantal vertragingslijnen is bij de synthese-telescoop het systeem gekozen, waarbij elke telescoop zijn eigen twee vertragingslijnen (één voor elke voorversterkeruitgang) heeft.
De compensatie vindt hierbij niet plaats van één telescoop van een interferometer ten opzichte van de andere, maar in plaats daarvan ten opzichte van één vast punt in het midden van de rij van twaalf telescopen, zodat een golffront van een puntbron in de richting van waarneming alle correlatoren gelijktijdig bereikt.
Elke vertragingslijn kan volgens een binair systeem tot een maximale lengte van 1600 meter worden geschakeld in stappen van tien meter, waarbij de besturing plaats vindt door de centrale computer. De lengte van tien meter komt overeen met één golflengte op de bedrijfsfrequentie van de vertragingslijnen, zodat het schakelen van de lijnlengte niet gepaard gaat met een fasesprong in het uitgangssignaal.
Omdat de verliezen in de vertragingslijnen (waarvoor coaxiale kabel wordt gebruikt) aanzienlijk zijn, zou de ontvangerversterking tijdens de waarneming belangrijk veranderen bij

verandering van de lijnlengte. Om dit te vermijden, wordt bij uitschakelen van een lijnstuk een kort lijnstukje met hoge verliezen per lengte-eenheid ingeschakeld, dat dezelfde verliezen heeft als het uitgeschakelde stuk, waarmee bereikt wordt, dat de totale verliezen van een vertragingslijn onafhankelijk zijn van de looptijd.

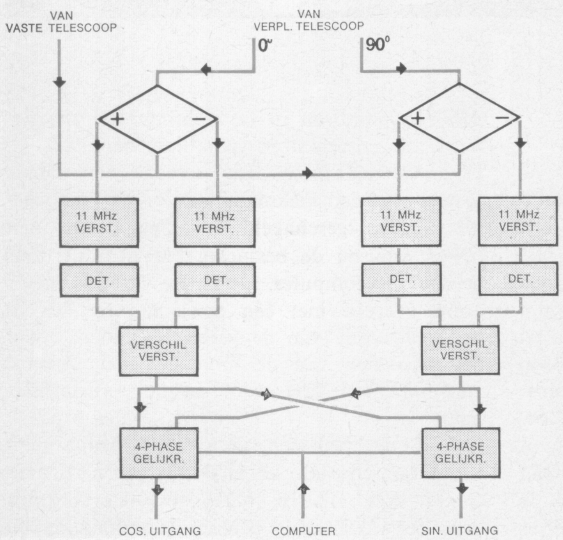
Omdat verliezen in coaxiale kabels toenemen met toenemende frequentie, zal door de verliezen in de verbindingskabels tussen telescopen en het centrale gebouw en in de vertragingslijnen een vervorming van de doorlaatband van de ontvanger optreden. Deze wordt in een speciale vereffeningsversterker gecompenseerd. Deze versterker vangt ook de in de kabels optredende totale verliezen op.
Het vertragingslijnsysteem is ondergebracht in de kelder van het bedieningsgebouw (zie de foto op de vorige pagina), mede omdat de lengte van de lijnen een functie is van de omgevingstemperatuur. Te verwachten is dat de keldertemperatuur slechts weinig en dan nog zeer geleidelijk zal veranderen.

**De correlatorschakeling**

Achter de vertragingslijnen volgt menging met behulp van een derde centrale oscillatorfrequentie van 41 MHz naar de laatste middenfrequentie van 11 MHz, waarna de uitgangsspanningen van de beide versterkerkanalen van een vast opgestelde telescoop worden gecombineerd met die van de beide versterkerkanalen van een verplaatsbare telescoop in vier correlatorkanalen (fig. 3), voor het meten van de polarisatie van de straling.
Aan de uitgang van elk correlatorkanaal, dat bestaat uit een som- en een verschilkanaal met detectoren en een schakeling die het verschil van de beide detectorspanningen meet, is dus een franjepatroon te verwachten bij waarneming van een puntbron of ander object. In werkelijkheid is bij de verplaatsbare telescopen de laatste mengtrap met de erop volgende verdeler nog dubbel uitgevoerd, waarbij het oscillatorsignaal bij de tweede mengtrap 90° in fase wordt verschoven, zodat de uitgangsspanningen van de verdelers onderling 90° in fase verschillen. Hierdoor ontstaat nog een tweede groep van vier correlatoren per interferometer, waarvan het uitgangssignaal, het franjepatroon, eveneens 90° in fase is verschoven ten opzichte van de eerste groep.
Men noemt de eerste groep correlatoren de cosinuscorrelatoren, en de tweede de sinuscorrelatoren, ze worden beide gebruikt voor het meten van de complexe zichtbaarheid.
Eén interferometer maakt dus gebruik van acht correlatorkanalen. Het totaal aantal correlatorkanalen is dus voor 20 interferometers 160.

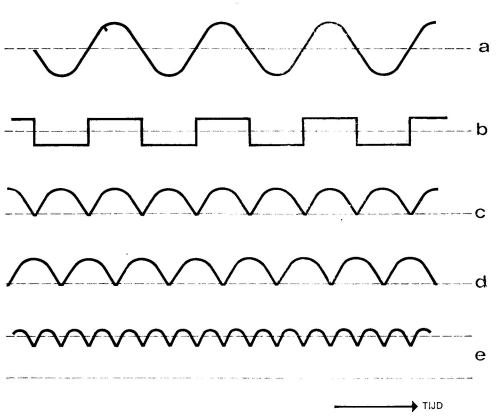
**De meting van de zichtbaarheid**

We zagen al, dat de meting van de zichtbaarheid de vergelijking inhoudt van de fase van




Links: Fig. 3. Vereenvoudigd schema van een correlatorschakeling met cosinus- en sinuscorrelatorkanaal en de uit twee 4-fase gelijkrichters bestaande schakeling voor de meting van de cosinus- en sinuscomponenten van de zichtbaarheid.

Rechtsboven: Fig. 4. a. Franjepatroon voor een puntbron in het midden van het veld, achter een cosinuscorrelatorkanaal. b. Door de computer berekende (cosinus-) schakelfunctie. c. Met de schakelfunctie gelijkgericht cosinusfranjepatroon. d. Met sinusschakelfunctie gelijkgericht sinusfranjepatroon. e. Uitgangsspanning van de 4-fase gelijkrichtschakeling. De gemiddelde waarde is evenredig met de cosinuscomponent van de zichtbaarheid.




het waargenomen franjepatroon (zoals dat achter de detectoren van een correlator optreedt) met de fase van een door de computer berekend franjepatroon. Men maakt hierbij gebruik van synchrone of fasegelijkrichting van het waargenomen sinusvormige franjepatroon.
De besturingscomputer berekent gedurende de waarneming op welke tijdstippen het franjepatroon voor een puntbron in het midden van het veld door nul gaat. Hij doet dit zowel voor het cosinus- als voor het sinusfranjepatroon. Keert men nu op deze ogenblikken telkens de fase van het waargenomen franjepatroon om, dan zal, als dit waargenomen patroon in fase is met het berekende, het uitgangssignaal achter deze faseschakelaar bestaan uit een gelijkgerichte sinusspanning (zie fig. 4), als men tenminste voor de gelijkrichting van een cosinusfranjepatroon ook de cosinusschakelfunctie gebruikt zoals die door de computer is berekend, en bij het sinusfranjepatroon de sinusschakelfunctie. Combineert men nu ook nog beide uitgangssignalen dan is het resultaat een vier-fase gelijkrichting van het franjepatroon, met als gemiddelde waarde een gelijkspanning die evenredig is met het reële deel (of de cosinuscomponent) van de zichtbaarheid. Combineert men ook het resultaat van twee andere gelijkrichtschakelingen, waarin het cosinusfranjepatroon wordt geschakeld door de sinusschakelfunctie en omgekeerd, dan zal een gelijkspanning optreden, die evenredig is met het imaginaire deel (of de sinuscomponent) van de zichtbaarheid. In het bovenstaande geval is die juist nul, maar hij zal toenemen bij toenemend faseverschil tussen waargenomen en berekend franjepatroon en een maximum bereiken bij een verschil van 90°. Daarbij is dan de cosinuscomponent nul geworden. Voor het afvlakken van de uitgangsspanning wordt een filter gebruikt met een tijdconstante van 20 sec.

De bovenstaande meetschakeling werkt alleen bevredigend indien de franjefrequentie niet te laag is. Bij hoge declinatie, en ook bij waarneming in de oost- en westrichting, wordt deze echter laag of zelfs nul. Daarom is in de ontvanger de franjefrequentie kunstmatig (door een vanuit de digitale klok bestuurde faserotator, die is opgenomen in een oscillatorleiding bij de beide verplaatsbare telescopen) met 2 Hz verhoogd, zodat deze steeds in het interval 2—2,5 Hz ligt.
Een reed-relaisscanner tast eens per tien seconden alle 160 uitgangen af, die door een digitale voltmeter worden gemeten en aan de computer ter registratie op magnetische band worden doorgegeven.

**De ijking van het ontvangersysteem**

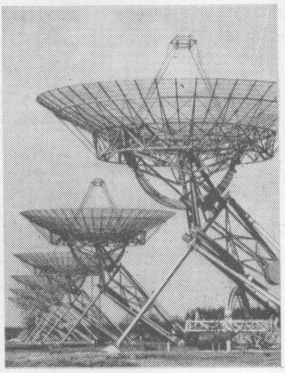
Voor de ijking van het gehele systeem van de synthese-telescoop wordt gebruik gemaakt van puntbronnen op nauwkeurig bekende posities. Bovendien kan de gevoeligheid van elke voorversterker worden gemeten met een ruisbron, die een bekend ruisvermogen aan de ontvangeringang kan afgeven.
In ontwikkeling is nog een fasecalibratiesysteem waarmee het fasegedrag van het gehele ontvangersysteem voortdurend wordt gemeten. Hierbij wordt tijdens de waarneming een ijksignaal, afkomstig van een centrale oscillator op de waarneemfrequentie, aan de ontvangeringang toegevoerd via een kabelsysteem, waarvan de lengtes door het calibratiesysteem voortdurend worden gemeten met een nauwkeurigheid van enkele tienden van millimeters, zodat de fase van het geïnjecteerde signaal nauwkeurig bekend is.

Het zal duidelijk zijn, dat het onmogelijk is in het bestek van dit artikel ook maar enigszins alle aspecten van het ontvangersysteem van de synthese-telescoop te bespreken, terwijl ook verschillende belangrijke details onbesproken moesten blijven. De auteurs zijn zich bewust, dat hierdoor ook op vele punten het werk, dat door velen in laboratoria van de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg en daarbuiten aan ontwerp en bouw van het systeem is verricht, niet voldoende tot zijn recht zal zijn gekomen.

# enkele astronomische problemen

**H. van der Laan,**
Sterrewacht te Leiden,

**H. van Woerden,**
Kapteyn Laboratorium
Groningen.



**voor de Synthese Radiotelescoop**

**te Westerbork**

De grote gevoeligheid, het hoge scheidende vermogen en de mogelijkheid nauwkeurig polarisatiegraden te bepalen wettigen de verwachting dat de nieuwe radiotelescoop veel duidelijk zal maken over het wezen van radiostelsels en quasars, over wat er gebeurt in het centrum van onze Melkweg, en over de fijn-structuur van melkwegstelsels.

**Inleiding en achtergrond**

De astronomie stelt zich, kernachtig uitgedrukt, ten doel inzicht te verkrijgen in de structuren, de ontwikkeling en de samenhang van de fysische systemen buiten de aardse dampkring. Voor dat inzicht is in de eerste plaats nodig kennis van de wetten die zich doen gelden in alle fysische systemen, die zowel micro- als macrofysische structuren bepalen en de hele bonte verscheidenheid van fysische processen mogelijk maken. Deze kennis is het cumulatieve resultaat van alle fundamenteel-fysisch en astrofysisch experimenteel en theoretisch onderzoek, inclusief het begeleidend en daaraan ten grondslag liggend mathematisch werk.
Bovendien vereist de vorming van astronomisch inzicht informatie omtrent de feitelijke stand van zaken en loop van de gebeurtenissen in de te onderzoeken objecten. Deze twee aspecten staan in voortdurende en innige wisselwerking, waarbij de fundamentele kennis de criteria verschaft aan de hand waarvan specifieke informatie wordt geselecteerd, terwijl de informatie zelf weer kan leiden tot wijziging of verdieping van de fundamentele kennis.

Behoudens enkele uitzonderingen — zoals de bijdrage van de kosmische stralenfysica, die deeltjes detecteert — wordt astronomische informatie gedragen door elektromagnetische golven, door telescopen geregistreerd. Deze telescopen bevinden zich voornamelijk op het aardoppervlak, dus onder de aardatmosfeer, maar worden nu ook in toenemende mate in satellieten buiten de atmosfeer gebracht.
De constructie van een telescoop hangt ten nauwste samen met het golflengtegebied in het elektromagnetische spectrum waarbinnen de waarnemer wenst te detecteren. In figuur 1 wordt de lezer herinnerd aan de verschillende gebieden, hun golflengtebereik en begrenzing, en hun benaming. De radio-astronomie is mogelijk geworden dankzij het zg. radiovenster in de atmosfeer, dat golven doorlaat van een lengte van $\pm$ 30 m tot $\pm$ 3 mm, hetgeen overeenkomt met frequenties van 10 Megahertz tot 100 Gigahertz ($10^7$ tot $10^{11}$ Hz).
Andere artikelen in dit nummer illustreren hoe een groot instrument dat in dit gebied golven detecteert, tot stand komt.

**Radio-astronomische informatie en de Westerbork Synthese Radiotelescoop**

In het algemeen kunnen sterrenkundige metingen worden gezien als metingen van de intensiteit en polarisatie van straling uit het heelal als functie van positie aan de hemel, van frequentie en van tijd. In principe worden deze

metingen dan ook gekarakteriseerd door een drievoudige resolutie (scheidend vermogen), nl. hoekresolutie, spectrale resolutie en tijdsresolutie. Afhankelijk van de soort informatie die men wenst te verkrijgen, worden instrumenten gebouwd die meestal in tenminste één van deze domeinen een zo goed mogelijke resolutie verschaffen.
In de radio-astronomie zijn vooral de eerste twee van belang, terwijl de tijdsresolutie een geringe rol speelt en de tijdsintegratie zich van ettelijke seconden tot vele uren kan uitstrekken. [1]) Het laatstgenoemde is het geval te Westerbork, waar het rotatiesynthesesprincipe wordt toegepast. Mocht een radiobron, door middel van deze techniek in beeld gebracht, al snel variërende componenten bezitten, dan zouden we slechts het gemiddelde over een periode van twaalf uur meten en alle fijnere tijdsstructuren zouden verdwijnen.

Het scheidend vermogen in hoek van de Westerbork Synthese Radiotelescoop (WSRT) is onmaar de praktische limiet, gesteld door atmosferische turbulentie.
De drie ellipsen geven de bundels van de WSRT op de schaal van de foto, bij 50, 21 en 6 cm. Fig. 2b toont het detail dat in deze nevel nog te zien zou zijn met de grootste van deze bundels, indien de intensiteitsverdeling bij radiogolflengtes dezelfde zou zijn als de visuele. In nabije stelsels (M51 ligt op een afstand van $\pm 10^{25}$ cm $= 10^{7}$ lichtjaren — kosmisch gesproken in onze eigen buurt) kunnen dus vooral bij 6 cm nog erg fijne details worden onderscheiden.

Daar bij sterrenstelsels met een uitzonderlijk groot radiovermogen, de zg. radiostelsels, de belangrijkste componenten veelal verspreid zijn over een gebied met een diameter die de optische diameter meer dan een factor tien overtreft, kunnen ook op afstanden tien tot honderd keer de afstand van M51 de belangrijke radiocomponenten en hun verbindingen nog in kaart worden gebracht.

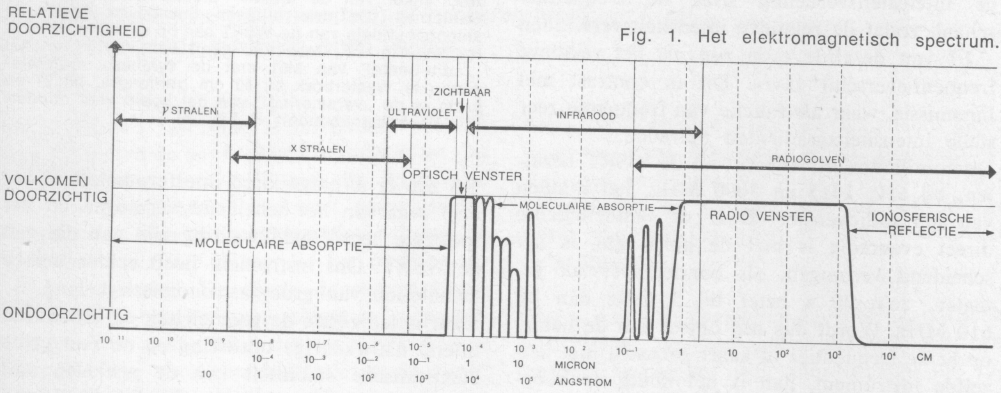



Fig. 1. Het elektromagnetisch spectrum.

geveer één boogseconde per centimeter golflengte. D.w.z. dat het instrument in staat is intensiteitsverschillen in kaart te brengen, indien de hoekafstand tussen meetbaar verschillende niveaus niet kleiner is dan $\lambda''$, waar $\lambda$ de golflengte in cm voorstelt. Het eerste ontvangersysteem (zie Muller en Casse's artikel in dit nummer) werkt bij een golflengte van ongeveer 21 cm: volgend jaar zal ook bij 50 en bij 6 cm worden gewerkt.
Figuur 2a toont een spiraalvormig sterrenstelsel door een optische telescoop gezien; in dit geval is het oplossend vermogen iets minder dan 1"; dit is niet de theoretische instrumentele grens,

Hoeveel spectrale informatie wordt verkregen, hangt af van het aantal frequentiebanden waarop kan worden gemeten, het totale frequentiebereik en de bandbreedte van elk kanaal. De aan het instrument te stellen eisen hangen hier weer geheel en al af van de soort straling die men wenst te meten.

[1]) Er zijn echter zeer belangwekkende uitzonderingen, zoals bij de studie van variabele, uiterst compacte componenten in quasars (zie Natuur en Techniek, mei 1967), waar intensiteitsvariaties in de loop van uren of zelfs van minuten denkbaar zijn; bij het onderzoek van pulsars blijven sommige pulsjes zelfs bij aftasting in microseconden nog fijnstructuur vertonen.

Boven: Fig. 2a. M51, sterrenstelsel in het sterrenbeeld De Jachthonden. Deze foto is gemaakt met de 200″ kijker van de Mount Palomar Sterrenwacht in Californië. (De drie ellipsen linksboven geven de antennebundels van de WSRT aan op dezelfde schaal). Rechts: Fig. 2b. Deze foto geeft een indruk van het ,,radio-beeld'' van M51 met de synthese radiotelescoop te Westerbork bij 50 cm golflengte; bij 21 en 6 cm is de ,,versmering'' van het beeld veel minder. (Zie de antennebundels in fig. 2a).

Continuüm-straling heeft een gladde regelmatige intensiteitsverdeling over de frequentieschaal, zodat de relatieve intensiteitsverschillen $\triangle I/I$ van dezelfde orde zijn als het relatieve frequentieverschil $\triangle \nu/\nu$. Dit in contrast met lijnemissie, waar als functie van frequentie zeer steile intensiteitsgradiënten optreden.

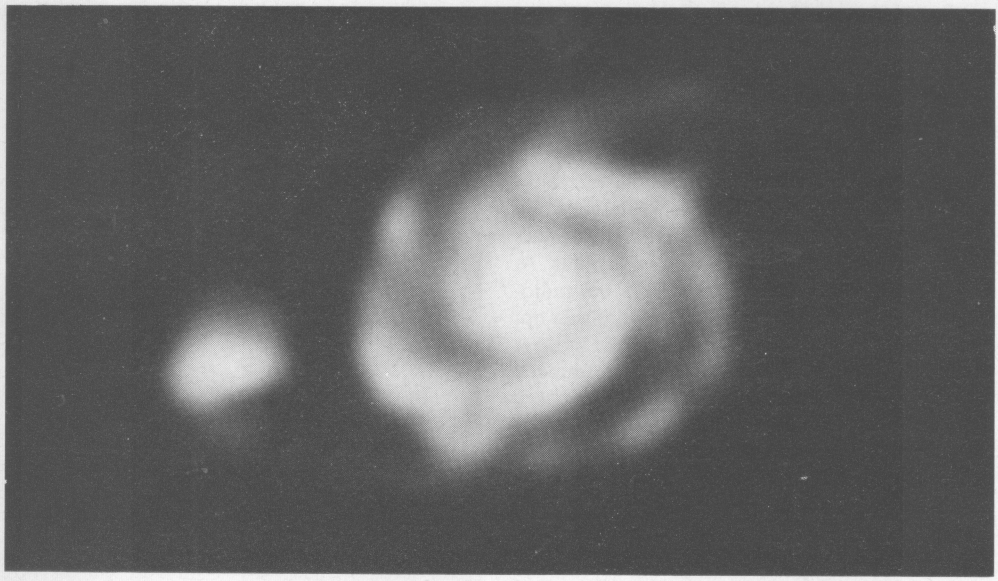
De continuüm-ontvangers van de WSRT bezetten, bij 610, 1415 en 5000 MHz, het midden van het radiovenster. Daar de bundelbreedte direct evenredig is met de golflengte, is het scheidend vermogen, als bundeloppervlak gemeten, zo'n 70 x beter bij 5 GHz dan bij 610 MHz. Wordt dus een object aan de hemel op beide frequenties in kaart gebracht met hetzelfde instrument, dan is het nodig de hoogfrequentiekaart uit te smeren tot de vagere beeldvorming van de laagfrequentiekaart, alvorens een detailvergelijking kan worden gemaakt en de verdeling van de intensiteitsverhouding op deze twee frequenties kan worden aangegeven.

De winst in spectrale informatie, verkregen door de toevoeging van een lage frequentie, wordt dus enigszins verschraald door het feit dat slechts het minst goede scheidend vermogen met deze informatie kan worden gecombineerd. Daar staat tegenover dat de meeste radiobronnen een spectrum vertonen van een intensiteit die toeneemt met toenemende golflengte. Voor problemen die de grootst mogelijke *gevoeligheid* vereisen, is de lange golf dus zeer geschikt.

Nu zijn er al enige jaren interferometers in bedrijf waarvan het scheidend vermogen en het spectrale bereik gelijkwaardig zijn aan die van de WSRT. Ons instrument heeft echter unieke kwaliteiten van groot astronomisch belang.

Daar is ten eerste de geometrisch en geodetisch uiterst nauwkeurige opstelling en de zeer grote elektronische stabiliteit (zie de artikelen van Hooghoudt en Baars, respectievelijk Muller en Casse). Dit stelt ons in staat uiterst nauwkeurige posities te meten ($\pm$ 0,1 boogsec t.o.v. een gespecificeerd punt van het gemeten veld) en detailstructuren nauwkeurig in kaart te brengen. Ten tweede moet de grote gevoeligheid worden genoemd (zie het artikel van Raimond) en tenslotte het vermogen om de polarisatiegraad en de polarisatiehoek van de gedetecteerde emissie te meten.

Het zijn deze drie uitmuntende eigenschappen die, in verband met de reeds omschreven resolutie in ruimtehoek en frequentie, de WSRT tot een prachtig instrument voor nieuw astronomisch onderzoek maken.

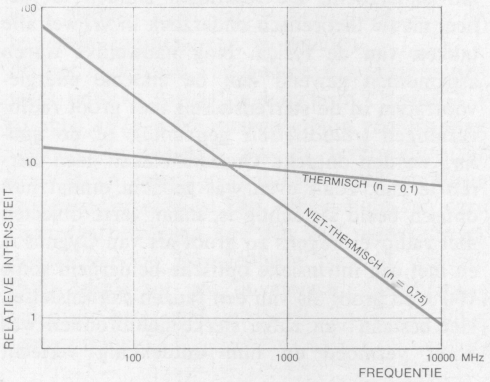


**Bronnen van continuüm-radiostraling**

Uit de optische astronomie was reeds lang bekend dat in ons Melkwegstelsel (een platte schijf van sterren, gas en stof met een diameter van 100.000 lichtjaren en een dikte van ongeveer een honderdste daarvan) gebieden voorkomen waar dichte massa's gas, stof en jonge sterren zijn opgehoopt, waar sterren nog worden gevormd en zware hete sterren door middel van hun ultraviolette straling het omringende waterstofgas ioniseren.
Zo'n *geïoniseerde waterstofwolk* of wolkencomplex, *H II-gebied* genoemd, is afgebeeld in fig. 4. Het is de Orionnevel, een gebied op een afstand van 1500 lichtjaren, met een massa van vele zonnemassa's (1 zonnemassa = 2 x $10^{33}$ gram).
Op theoretische gronden kan worden aangetoond, dat een H II-gebied een bron moet zijn van continuüm-radiostraling, veroorzaakt door de versnelling van vrije elektronen in het elektrostatische veld van de aanwezige protonen. Nu heeft elk stralingsmechanisme een eigen, karakteristiek spectrum. Het spectrum van deze, zg. vrij-vrijstraling wordt gekenmerkt door een intensiteit die nauwelijks afneemt bij afnemende golflengte.

Toen in de jaren vijftig de hemel systematisch met radiotelescopen werd afgetast, werden er heel veel meer discrete bronnen ontdekt dan verwacht mocht worden op grond van de aantallen bekende H II-gebieden. Ook was de verdeling van de bronnen vrijwel isotroop en geenszins beperkt tot de Melkwegschijf. Toen de intensiteit van de bronnen op andere frequenties gemeten werd, bleek het spectrum van de overgrote meerderheid ook een ander karakter te vertonen dan dat van een H II-gebied. De intensiteit nam snel af met afnemende golflengte. Deze spectra werden *niet-thermische spectra* genoemd, in tegenstelling tot de spectra van H II-gebieden die door straling van een geioniseerd gas in thermisch evenwicht ontstaan. In fig. 3 wordt een en ander geïllustreerd.
Nauwkeurige positiebepalingen van enkele sterke bronnen uit de vroege onderzoekingen maak-

Fig. 3. Spectra van continuüm-radiostraling.



ten het mogelijk met optische telescopen te zoeken naar visueel waarneembare objecten bij de radiobronnen. Verrassend was het resultaat dat deze bronnen konden worden geïdentificeerd met *extragalactische stelsels,* d.w.z. sterrenstelsels ver van het onze verwijderd.
Fig. 5 geeft een recent radiobeeld, gemaakt met de Cambridge One Mile Telescope bij 5 GHz, van de eerste bron die als extragalactisch werd geïdentificeerd. Het is Cygnus A, de op één na helderste bron aan de radiohemel. Groot was de opwinding, toen uit de optische gegevens bleek dat de afstand maar liefst een half miljard lichtjaren bedraagt! Immers, als een der helderste bronnen al zo ver weg ligt, betekent dit dat het intrinsieke vermogen van sommige stelsels zo groot is, dat zulke bronnen op nog veel grotere afstand ook nog te detecteren zouden zijn.
Deze ontdekking verzekerde dus meteen dat de radio-astronomie de verste (dus vroegste) gebieden van het heelal zou kunnen exploreren, iets wat in de optische sterrenkunde niet mogelijk leek. Als Cygnus A zeven keer verder weg lag en dus zo'n factor 50 zwakker zou lijken, zou hij daarmee de optische detectielimiet al zijn gepasseerd. Met een gevoelige radiotelescoop echter zou deze bron 500 x zwakker mogen zijn, terwijl nú de WSRT in staat is een 10.000x zwakker signaal te meten. Hieruit volgt dat van de zwakke bronnen in bestaande catalogi sommige nabij de horizon van het heelal staan. Met de uiterst gevoelige WSRT verwachten wij op die horizon te zullen stuiten.

Fig. 4. De Orionnevel, een waterstofwolk van grote dichtheid waarin zich ruim 10.000 jaar geleden een aantal sterren hebben gevormd, die de wolk nu tot „lichten" brengen.

In de jaren zestig heeft het astronomisch onderzoek, vooral dank zij de doorbraak van de radio-astronomie, een geweldige vlucht genomen. Allerlei fysisch fascinerende objecten werden op radiogolflengtes ontdekt en daarna met zowel radio- als optische telescopen in detail onderzocht. De resultaten leidden tot geheel nieuw theoretisch onderzoek in vrijwel alle takken van de fysica. Nog nauwelijks waren astronomen gewend aan de enorme energievoorraden in de sterrenstelsels met groot radiovermogen (*radiostelsels* genoemd), of de *quasars* werden ontdekt. Quasars bleken geen sterren te zijn, zoals even was gedacht omdat hun optisch beeld sterachtig is, maar verre objecten met radiovermogens zo groot als van Cygnus A en met een intrinsieke optische helderheid soms 100 x zo groot als van een reuzen-sterrenstelsel. Het bestaan van zulke sterke lichtbronnen was nooit vermoed en hun ontdekking verleent aan het optisch sterrenkundig onderzoek nieuw en groot belang voor de kosmologie.
In hun radiostructuur onderscheiden de quasars zich niet eenduidig van de radiostelsels, ofschoon statistisch gesproken een quasar vaak een sterke maar uiterst kleine radiobron in zijn optisch centrum bevat, iets wat ook bij radiostelsels wel voorkomt, maar minder vaak en meestal minder sterk.
De meeste radiostelsels vertonen een dubbele structuur als Cygnus A in fig. 5. Ver van het optisch waarneembare object stralen de radiocomponenten. Die afstand varieert van enkele duizenden tot, in extreme gevallen, een miljoen lichtjaren. Er zijn gevallen waar de dubbele structuur zich enkele keren, op verschillende schaal, herhaalt. Ondanks vele theoretische pogingen bestaat er nog weinig inzicht in de oorzaak van deze dubbele, vaak bijna symmetrische structuur.

Onderzoek van *nabije stelsels* zoals M51 (fig. 2) heeft tot resultaat gehad dat in de kern van dergelijke stelsels soms kleine radiobronnen werden gevonden. Vaak zijn ze relatief erg zwak, zodat grote gevoeligheid en een goed

scheidend vermogen vereist zijn om dit verschijnsel in meer dan een handvol stelsels in onze directe omgeving te bestuderen. De WSRT is als geen andere telescoop in staat hier nieuwe grenzen te bereiken.
Het grote voordeel van een onderzoek van nabije systemen is dat het radio-onderzoek daar kan worden vervolgd met infrarood, optisch en Röntgenonderzoek van allerlei details die in verre stelsels aan detectie ontsnappen. Juist zulk veelzijdig onderzoek verschaft de informatie waarvan nieuw inzicht verwacht mag worden.

Wij hebben nu drie categorieën extragalactische radiobronnen onderscheiden, nl. de normale stelsels, met soms een zeer zwakke achtergrondstraling en een kleine puntbron in de kern, de radiostelsels, duizend tot een miljoen keer sterker, met vaak stralingsgebieden ver buiten het optische object en soms een compacte bron in het centrum, en tenslotte de quasistellaire bronnen of quasars, met groot radiovermogen en vaak een krachtige bron van kleine omvang in het centrum.
De quasars zijn in het heelal bijzonder zeldzaam en in een kosmisch volume met tien miljoen normale stelsels is niet altijd een quasar te vinden. Hun enorme intrinsieke helderheid echter maakt ze zichtbaar voor gevoelige instrumenten tot in de verste verten van het heelal. Eén quasar die toevallig betrekkelijk in de buurt staat, 3C273, is te zien in fig. 6. De afstand is 1500 miljoen lichtjaren, maar ook aan de grens van een ruimte, die honderd keer zo groot is als het volume binnen de genoemde afstand, zou deze kosmische vuurtoren nog te zien zijn.

Ondanks hun grote verscheidenheid hebben al deze bronnen hun spectrum gemeen, en wel de niet-thermische soort. Bovendien is de straling van al deze bronnen matig tot zwak lineair gepolariseerd. Dit spectrum en deze polarisatie verwijzen naar slechts één stralingsmechanisme, „Magnetobremsstrahlung" of *synchrotronemissie* genoemd, waarbij „relativistische" (d.i. met lichtsnelheid bewegende) elektronen door zwakke magneetvelden in spiraalbanen worden gedwongen. De in zo'n baan optredende versnelling geeft aanleiding tot elektromagnetische golven, waarvan de frequentie recht evenredig is met het kwadraat van de deeltjesenergie en met de sterkte van het magneetveld.
Deze straling is bijna volledig lineair gepolariseerd in de richting loodrecht op de snelheid en het magneetveld. Voor één deeltje is de straling beperkt tot een naaldscherpe kegel, gecentreerd op de snelheidsrichting van het moment. Hieruit volgt dat de polarisatierichting de gemiddelde richting van het magneetveld in het stralende gebied aanduidt. Het spectrum, de intensiteit en de afstand van een bron stellen ons dan in staat de sterkte van het veld en de energie van het deeltjesreservoir te berekenen. Een gedetailleerde bepaling van de helderheidsverdeling *en* de polarisatieverdeling stellen ons dus in staat zowel de veldstructuur als de ruimtelijke energieverdeling te bepalen. Slechts met die informatie mag men hopen, het probleem van de dynamica en de evolutie van een radiobron te kunnen stellen. Juist omdat de meeste energie in de deeltjes schijnt te zitten, is kennis

Fig. 5. 5 GHz radiobeeld van Cygnus A met de Cambridge One Mile Telescoop (1969, M.N.R.A.S. 146, 223, Mitton en Ryle).

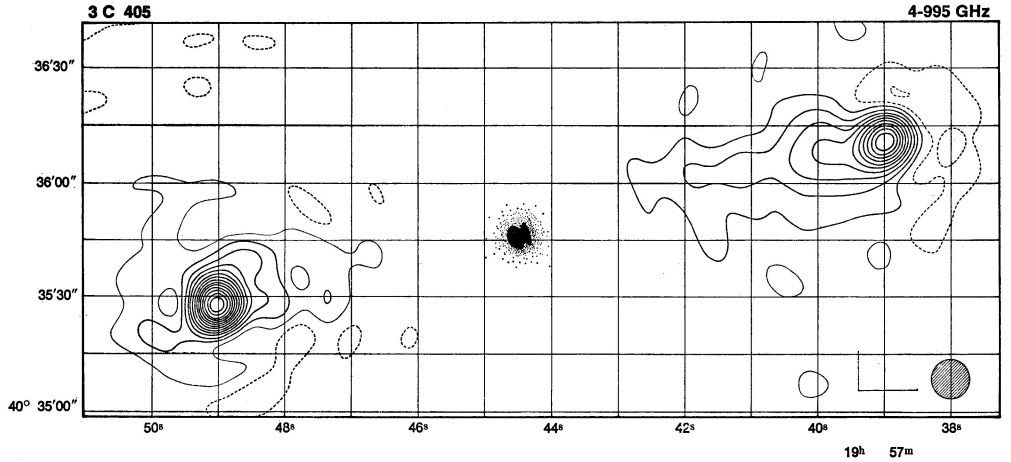
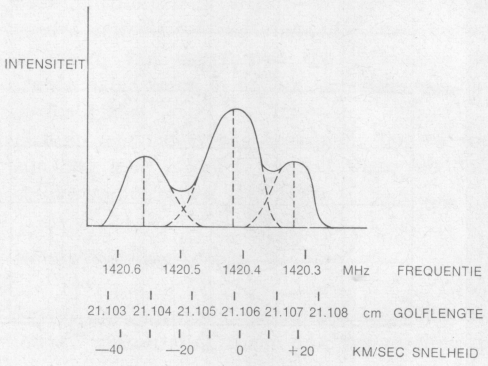


Fig. 6. De quasar 3C273.

van de structuur en de sterkte van het magneetveld zo belangrijk. Dat veld namelijk stelt niet alleen de deeltjes in staat te stralen, maar houdt ze ook vast en koppelt hun dynamica met die van het gewone gas in de radiobron.
Tot dusver is het niet mogelijk gebleken het probleem te formuleren, omdat vrijwel alle gegevens over ruimtelijke details van de polarisatieverdeling en dus van de magnetische structuur ontbraken. De WSRT is het eerste instrument dat een grote polarisatiegevoeligheid combineert met een fijn scheidend vermogen.
Juist deze combinatie is onontbeerlijk voor het verkrijgen van de zojuist geschetste essentiële informatie.

Ofschoon nog veel vragen omtrent de structuur en de ontwikkeling van radiobronnen onbeantwoord zijn gebleven, is nu wel duidelijk dat het hier gaat om *explosieve gebeurtenissen,* die plaats vinden in de kernen van sterrenstelsels en quasars. Want juist bij zulke gebeurtenissen komen relativistische deeltjes vrij, of dat nu een uitbarsting op de zon, de ontploffing van een ster (een supernova, waarvan de resten ook radiobronnen blijken te zijn) of de uitbarsting in een Melkwegcentrum of quasar betreft.
Optische spectroscopie toont aan dat deze verschijnselen gepaard gaan met heftige bewegingen van grote gasmassa's, die uit het explosiecentrum worden gestoten. De quasar 3C273 (fig. 6) en het sterrenstelsel M87 (fig. 10) vertonen zelfs slierten of „jets", duizenden lichtjaren lang, die vermoedelijk het gevolg zijn van dergelijke gebeurtenissen.
Het is interessant dat diep begraven in de kern van M87, zelf een radiostelsel waarvan de afmetingen het stellaire gebied ver overtreffen, een radiobronnetje is ontdekt, dat slechts enkele lichtmaanden groot is. Blijkbaar herbergen zul-

Fig. 7. Profiel van de waterstofstraling, opgevangen uit één richting. De intensiteit is uitgezet tegen de frequentie, maar golflengte en snelheid in de gezichtslijn zijn equivalent met de frequentie. Het profiel bevat 3 componenten (gestippeld), afkomstig van 3 wolken waterstofatomen, met (gemiddelde) snelheden van —32, —2 en +18 km/sec; in iedere wolk vertonen de snelheden der atomen een aanzienlijke spreiding. Snelheden van de aarde af worden positief gerekend, naar de aarde toe negatief.



ke kernen objecten met een ongedacht grote energiedichtheid, die nu en dan onstabiel worden en exploderen. Ook het wonderlijke feit dat vrijwel alle quasars en de kernen van vele actieve sterrenstelsels meetbare variaties in optische en radio-intensiteit vertonen, soms in een enkele nacht, wijzen op zo'n compact centrum van activiteit.
Ook in ons eigen Melkwegcentrum staat een radiobron, en waarnemingen met de telescoop te Dwingeloo hebben de aanwezigheid aangetoond van gas dat snel uit dit centrum wegstroomt.
Al deze gegevens duiden op een kwalitatief eender verschijnsel, met enorme kwantitatieve verschillen. Indien de fundamentele fysica in al deze kernen echter dezelfde is, zullen wij door de grote gevoeligheid van de nieuwe Nederlandse radiotelescoop veel over deze boeiende fenomenen kunnen leren. Want zowel voor de detailstudie van nabije stelsels als voor statistisch onderzoek van grote aantallen verre objecten, heeft dit instrument onovertroffen eigenschappen.

**Lijnstraling en de bouw van sterrenstelsels**

We spreken van lijnstraling, wanneer een (aards of hemel-)lichaam straling uitzendt van één golflengte, of bij een aantal scherp bepaalde golflengtes. Gloeiend natriumgas zendt geel licht uit, met twee iets verschillende golflengtes (een „dubbele spectraallijn"); gloeiend waterstofgas, zoals dat in bijvoorbeeld de Orionnevel voorkomt, emitteert behalve een continuüm (zie voorgaande) ook lijnstraling, hele series spectraallijnen zelfs: sommige zichtbaar als licht, andere waarneembaar als radiostraling. En koud waterstofgas straalt ook: het zendt radiostraling uit met een golflengte van 21,1061 cm, frequentie 1420,406 MHz.
Golflengte en frequentie zijn zo scherp bepaald, doordat lijnstraling optreedt bij overgang van een atoom uit een (vast) energieniveau naar een ander (vast) energieniveau. Gebruikt men echter een zeer selectieve ontvanger, dus met een groot scheidend vermogen in frequentie (en golflengte), dan blijkt de aan de hemel waargenomen waterstofstraling toch eni-

Fig. 8. Plattegrond van waterstofgas in het Melkwegstelsel. De hoeveelheid waterstof (eigenlijk: de dichtheid van het gas) is aangegeven door verschillende arceringen. De plaats van de zon is gemarkeerd door een stip in een kringetje. De gebieden met grootste waterstofdichtheid blijken gerangschikt te zijn in een spiraalpatroon.

ge variatie in golflengte te vertonen. Deze variatie is een gevolg van het feit dat de stralende atomen bewegen ten opzichte van de telescoop; de waargenomen golflengte wordt groter (de frequentie lager), naarmate de atomen zich sneller van ons verwijderen (fig. 7). Meet men met een radiotelescoop, in een bepaalde richting opgesteld, het „lijnprofiel" van de waterstofstraling (dat is de stralingsintensiteit bij verschillende frequenties) dan volgt daaruit het aantal waterstofatomen met verschillende snelheden. Als — zoals in fig. 7 — het lijnprofiel enkele componenten bevat, betekent dit, dat we in één richting achter elkaar enkele groepen waterstofatomen waarnemen — gaswolken of complexen mogen we ze noemen —, ieder met een andere snelheid. Bij meting van de lijnprofielen in naburige richtingen zal blijken, over welk gebied aan de hemel zo'n gaswolk zich uitstrekt.

Metingen van de lijnstraling met 21 cm golflengte, uitgezonden door „interstellaire" waterstofatomen (in de ruimte tussen de sterren), zijn van groot belang geweest voor het onderzoek van de bouw van het Melkwegstelsel — het grote sterrenstelsel waarin de zon één van de miljarden sterren is, en dat zich aan de hemel aftekent als een zwak lichtende band, de Melkweg.
Onderzoekers in Nederland en Australië bepaalden in de jaren vijftig de snelheden van gascomplexen op vele plaatsen in de Melkweg. Ze vonden dat deze complexen over grote delen van de Melkweg samenhangende structuren vormen, en dat de bewegingen van de gascomplexen geordend zijn: het gas in het Melkwegstelsel draait, met snelheden van een paar honderd kilometer per seconde, om het middelpunt van het stelsel, zoals de koffie in een kopje waarin even is geroerd. Onderstellend dat deze geordende bewegingen door een eenvoudige formule konden worden beschreven, kon men vervolgens uit de waargenomen snelheden van gascomplexen hun plaats in het stelsel afleiden. De plaatsen der gascomplexen bleken gerangschikt in een ruwweg spiraalvormig patroon (fig. 8).
Zorgvuldige, moeilijke waarnemingen van sterren (met optische technieken) hadden al eerder aanwijzingen verschaft dat het Melkwegstelsel roteert, maar ze leverden geen betrouwbaar totaalbeeld: het licht ondergaat teveel verzwakking in interstellaire stofwolken; met de optische methode kon men daardoor slechts een klein deel van het stelsel overzien. De radiowaarnemingen van het gas gaven nu in korte tijd een veel vollediger beeld van de rotatie en de bouw van het gehele Melkwegstelsel.
Toch vertoont ook het door de 21 cm-straling verschafte totaalbeeld nog belangrijke gebreken. Is er evenwicht tussen de zwaartekracht en de middelpuntvliedende kracht van de rotatie?; anders gezegd: draait het gas in cirkelbanen om het centrum van het Melkwegstelsel? Ongetwijfeld wijkt het gas af van de regelmaat van de cirkelbeweging, maar we weten niet hoevéél en wáár; en omdat we de bewegingen van het gas niet volledig kennen, kunnen we uit de waargenomen snelheden van de gascomplexen dan ook hun plaats in het stelsel niet goed afleiden. Daardoor zijn we weinig zeker van de spiraalstructuur van ons Melkwegstelsel; we kennen het veel minder goed dan een stelsel zoals M51 (fig. 2a). Het scheidend vermogen van de radiotelescoop in Dwingeloo, ongeveer zes-tiende graad aan de hemel, komt bij het onderzoek van de Melkweg neer op ongeveer 300 lichtjaren, een driehonderdste van de middellijn van het stelsel; maar in de beste plattegrond van het Melkwegstelsel (fig. 8) komen onbekende fouten voor van 3000 lichtjaren! De fundamentele moeilijkheid is, dat aarde en zon zich in het vlak van de Melkwegschijf bevinden: we zien de plattegrond op zijn kant (vgl. fig. 9), en moeten daardoor uit de gemeten snelheden zowel de rotatie van het stelsel als zijn structuur afleiden.

Veel gunstiger is de situatie bij waarneming van sterrenstelsels buiten het onze. Een stelsel als M51 kunnen we in zijn geheel overzien. Meting van de 21 cm-lijnstraling maakt het rechtstreeks mogelijk, het waterstofgas in het gehele stelsel in kaart te brengen, en daaruit ook de totale hoeveelheid gas in het stelsel af te leiden. Een selectieve ontvanger is daarvoor niet eens nodig: het is voldoende, de totale intensiteit van de lijnstraling overal in het stelsel te bepalen. De waterstofkaart kan men vervolgens vergelijken met het optische beeld (een

Fig. 9. Het sterrenstelsel NGC 4565 lijkt op een wiel dat we „op zijn kant" zien. Het verschilt in vorm waarschijnlijk weinig van ons Melkwegstelsel en ook van M51 (figuur 2a); maar dit laatste zien we „van boven" en ook de plattegrond van het Melkwegstelsel (figuur 8) is „van boven" gezien. Bij waarneming „op de kant" is de spiraalstructuur niet rechtstreeks zichtbaar. (Opname Hale sterrewachten)

foto), en de relaties bestuderen tussen de waterstofcomplexen en de heldere plekken (stergroepen) op de foto. Met behulp van een selectieve ontvanger kan men de snelheid van de waterstof in verschillende delen van het stelsel meten, de systematiek daarvan bestuderen, en daaruit conclusies trekken over het zwaartekrachtsveld in het stelsel. Daaruit volgt weer de totale hoeveelheid materie in het stelsel, en de verdeling daarvan over het stelsel als geheel.
Vergelijking van gasmassa en totale massa laat zien, welk gedeelte van de materie zich in gaswolken bevindt en welk gedeelte in sterren. Het gaspercentage is het hoogst in stelsels, waar zich nog niet zoveel sterren uit het gas hebben gevormd; in zulke „jonge" stelsels is het proces van stervorming nog in volle gang.

Maar deze schets van wat men met de waterstoflijn in een sterrenstelsel kan doen, is rijkelijk optimistisch. Het kan in principe; in de praktijk is men nog niet ver gevorderd. De lijnstraling is zwak. En, erger, de tot nu toe voor dit soort onderzoek gebruikte radiotelescopen (met afmetingen tot ongeveer honderd meter) geven een scheidend vermogen van op zijn best 500 boogseconden; dat is in M51 zo'n 20.000 lichtjaren! Men heeft dus niet meer dan een globaal beeld van het waterstofgas in zulke stelsels kunnen ontwerpen, en de daaruit getrokken conclusies zijn nog heel onzeker.
De synthese-telescoop in Westerbork zal hierin grondig verandering brengen. Hij verschaft een scheidend vermogen van 22 boogseconden, ongeveer 1000 lichtjaren in M51, een kleine fractie van de afmetingen van het stelsel zelf; men kan het in de vorige alinea beschreven programma dan volledig uitvoeren. En dit zal mogelijk zijn in tientallen sterrenstelsels. Wanneer over enkele jaren, hopelijk in 1972, een ontvanger voor het meten van 21 cm-lijnstraling aan de synthese-telescoop kan worden verbonden, zal men dus een veel beter inzicht kunnen krijgen in de bouw, dynamica en evolutie van sterrenstelsels zoals het onze.
Door zijn grote gevoeligheid en hoge scheidend vermogen biedt de telescoop hiertoe unieke mogelijkheden. Voor dit werk zal een grote, ingewikkelde ontvanger (tenminste 1000 kanalen) nodig zijn; verwerking en analyse van het waarnemingsmateriaal zullen hoge eisen stellen aan elektronische èn menselijke breinen. Er is echter geen twijfel aan, dat de vereiste inspanning rijkelijk zal worden beloond.

**Slotwoord**

We hebben getracht in dit artikel een aantal problemen te schetsen, die thans in de radiosterrenkunde actueel zijn en voor de oplossing waarvan de synthese-telescoop grote mogelijkheden biedt. Maar het belangrijkst en interessantst zijn die problemen die we nú nog niet kennen, en die door de telescoop zelf zullen worden opgeworpen ... We zien er met gespannen verwachting naar uit!

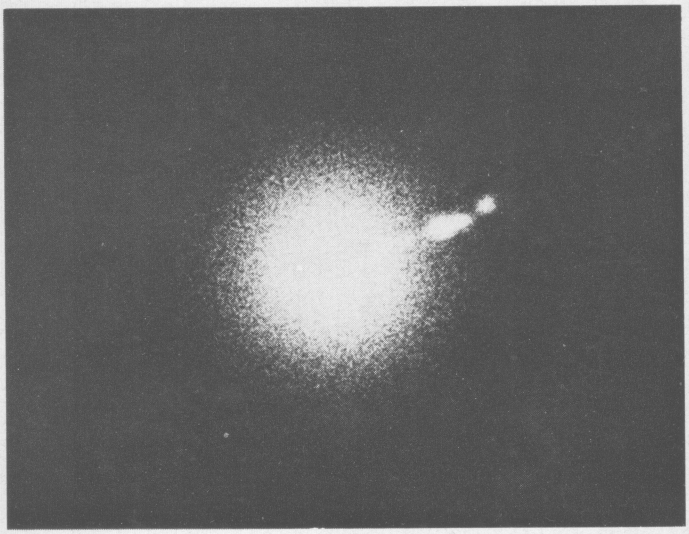


Fig. 10. De „jet" van M87.

De Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg heeft haar Bureau gevestigd in de Radiosterrenwacht, Oude Hoogeveensedijk 4 te Dwingeloo.

De Radiosterrenwacht te Westerbork is een onderdeel van de Stichting.

De Stichting wordt gefinancierd door de Nederlandse Organisatie voor Zuiver-Wetenschappelijk Onderzoek (Z.W.O.) te Den Haag.

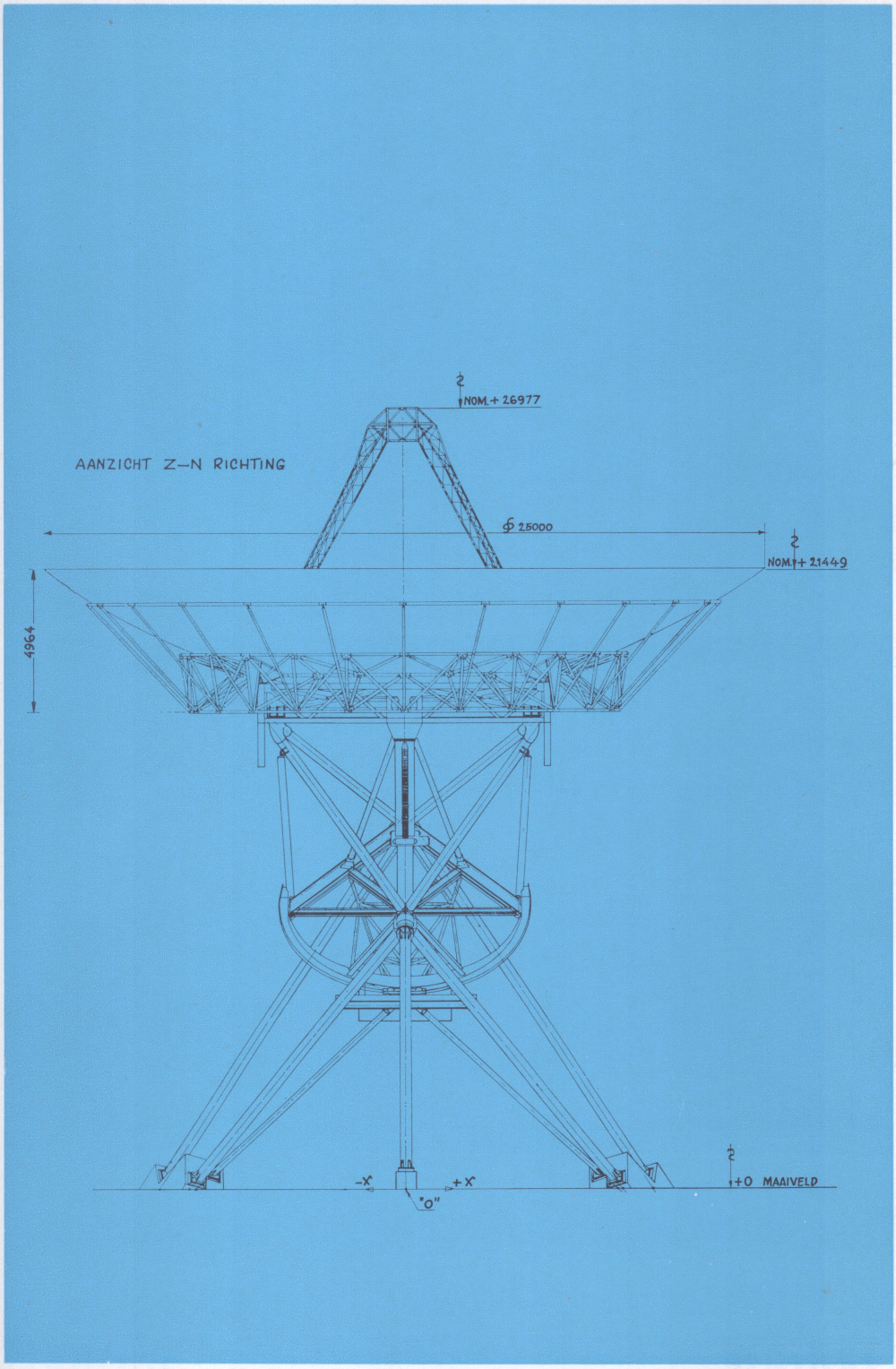
De Radiosterrenwachten te Dwingeloo en Westerbork zijn voor het publiek te bezichtigen in de zomervakantie-periode. Inlichtingen en toegangsbewijzen zijn gratis verkrijgbaar bij de V.V.V.-kantoren te Westerbork (tel. 05933-1425), Hooghalen (tel. 05939-300) en Dwingeloo (tel. 05219-1331).

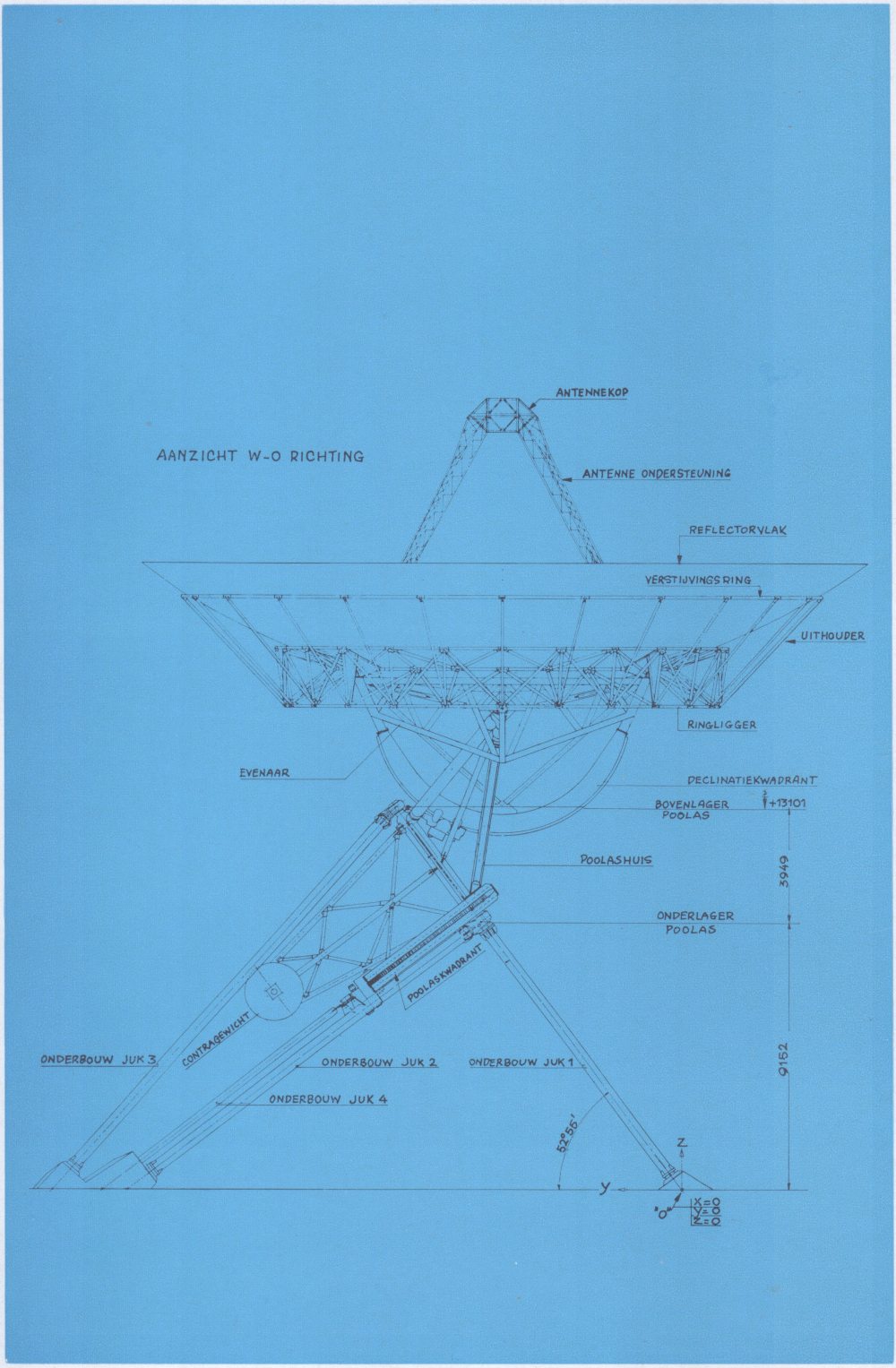
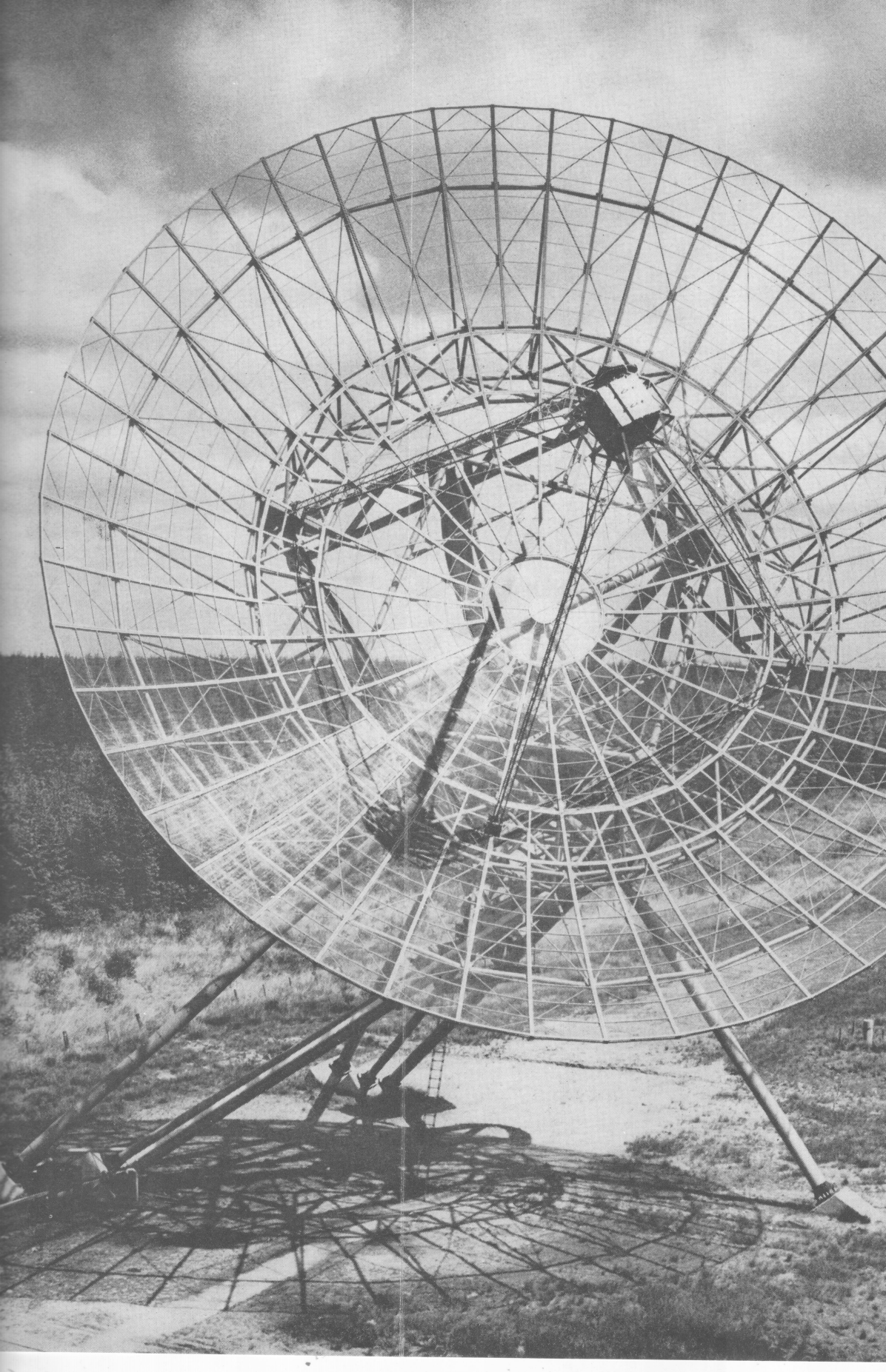
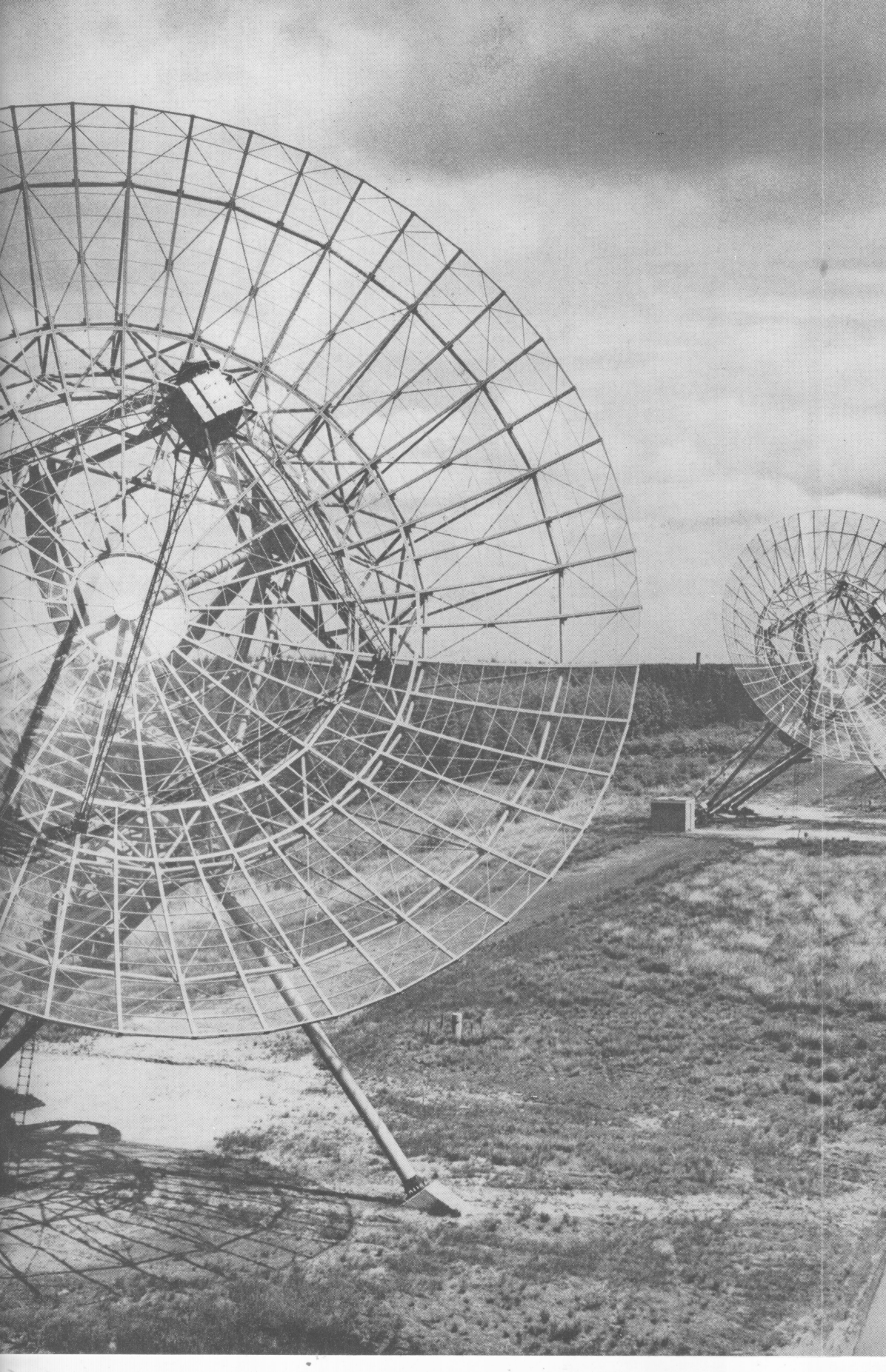
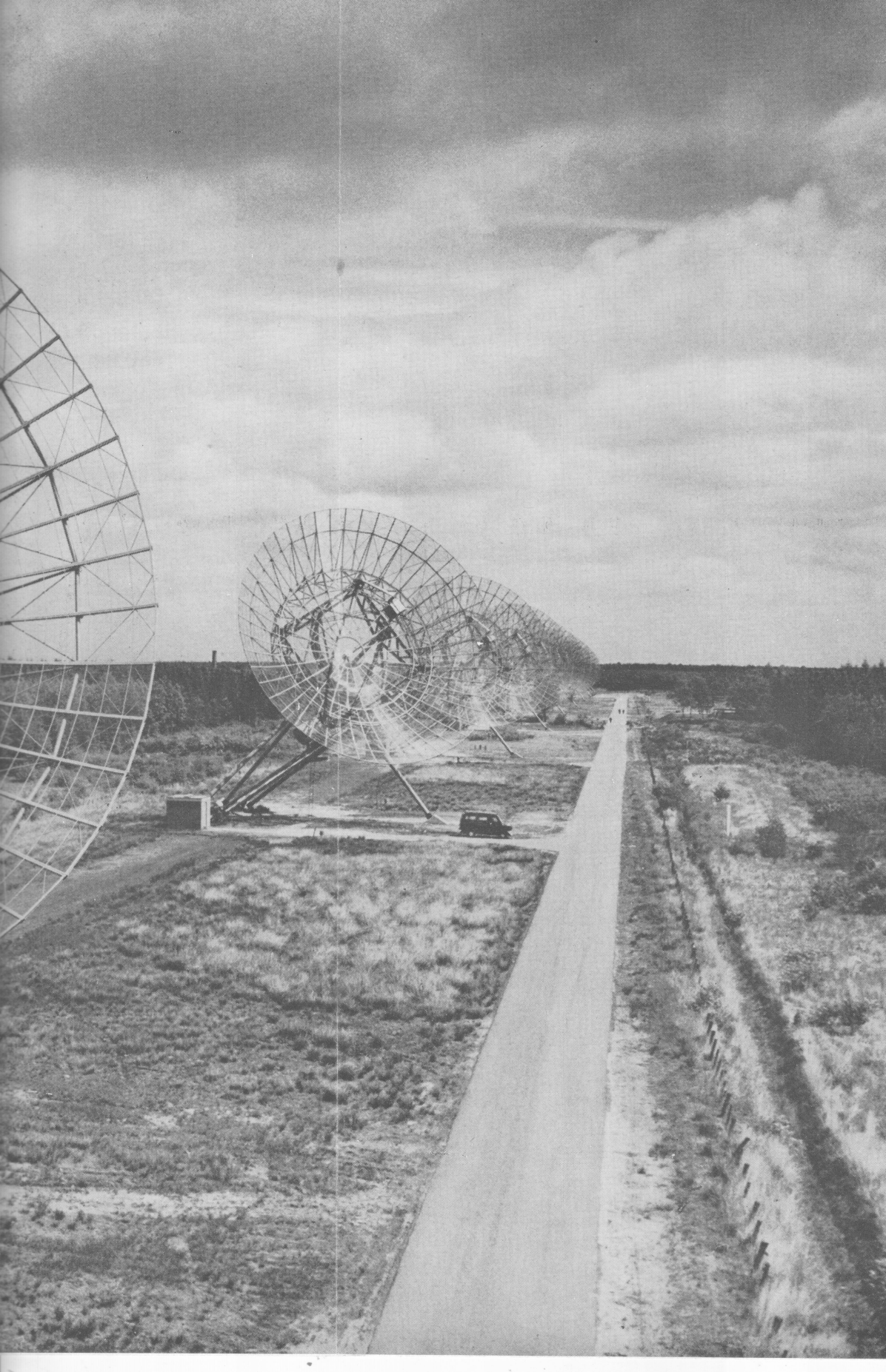
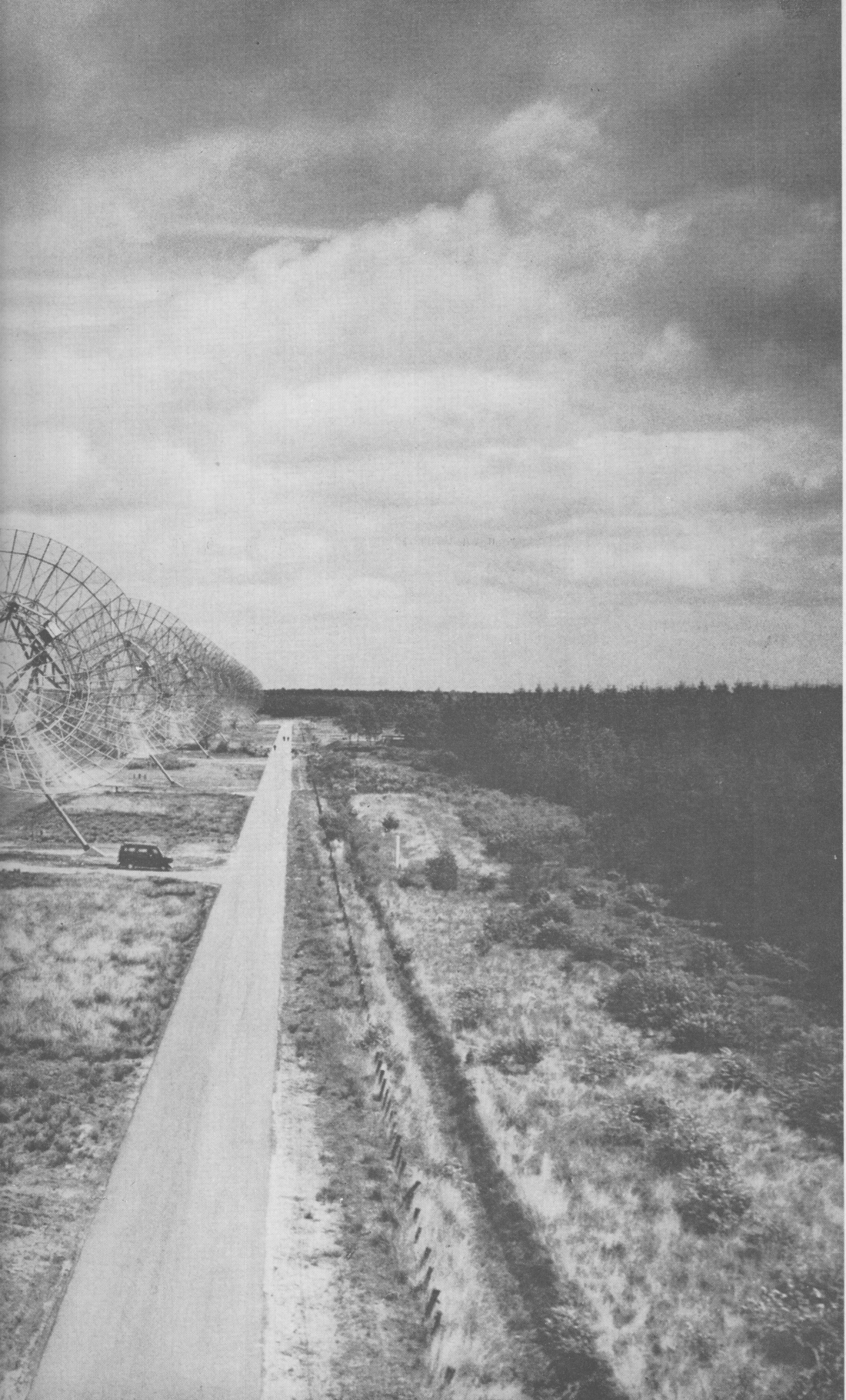
Oorspronkelijke uitgave:

natuur en techniek

juni 1970, 38e jaargang nr.6

Redactie:
Laan van Hövell tot Westerflier 13,
Heerlen (Ned.)


AANZICHT Z–N RICHTING
NOM.+ 26977
Φ 25000
NOM.+ 21449
4964
-X
+X
"0"
+0 MAAIVELD


AANZICHT W-O RICHTING
ANTENNEKOP
ANTENNE ONDERSTEUNING
REFLECTORVLAK
VERSTIJVINGSRING
UITHOUDER
RINGLIGGER
EVENAAR
DECLINATIEKWADRANT
BOVENLAGER POOLAS
+13101
POOLASHUIS
3949
ONDERLAGER POOLAS
POOLASKWADRANT
CONTRAGEWICHT
ONDERBOUW JUK 3
ONDERBOUW JUK 2
ONDERBOUW JUK 1
ONDERBOUW JUK 4
9152
52°56'
Z
y
X=0
Y=0
Z=0

natuur
en
techniek